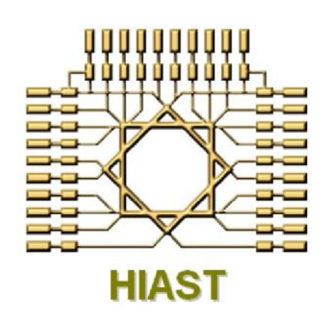
الجمهورية العربية السورية

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

قسم الفيزياء التطبيقية

ماجستير علوم وهندسة الموادّ



دراسة تحضير وتوصيف لقمة كربيدية من مادة كربيد التنغستن بتقانة تعدين المساحيق (PM).

"Preparation and characterization of tungsten carbide Insert by Powder Metallurgy Technology"

بحث أعد لنيل درجة الماجستير في علوم وهندسة المواد

اختصاص علوم وتكنولوجيا التعدين.

إعداد : المهندس محمد نزار الحموي

المشرف : الدكتور رفيع جبره

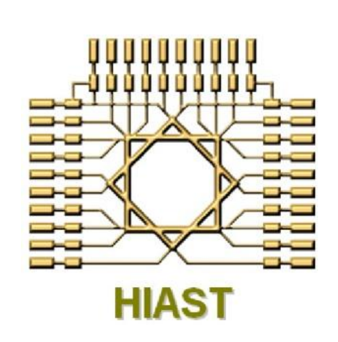
٢٠١٤ م

الجمهورية العربية السورية

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

قسم الفيزياء التطبيقية

ماجستير علوم وهندسة الموادّ



دراسة تحضير وتوصيف لقمة كربيدية من مادة كربيد التنغستن بتقانة تعدين المساحيق (PM).

"Preparation and characterization of tungsten carbide Insert by Powder Metallurgy Technology"

بحث أعد لنيل درجة الماجستير في علوم وهندسة المواد– اختصاص علوم وتكنولوجيا التعدين

إعداد : المهندس محمد نزار الحموي

المشرف : الدكتور رفيع جبره

٢٠١٤

المحتويات

١ – الفصل الأول : الدراسة النظرية

٢- الفصل الثاني: المواد والتجهيزات والطرائق

٢-٤ الطرائق

٣- الفصل الثالث : النتائج والمناقشة

٤- الفصل الرابع : الاستنتاجات والتوصيات

فهرس الأشكال

فهرس الجداول

شكر وتقدير

أولاً الحمد لله العليّ القدير على إعانته وتوفيقه لي على إتمام هذا المشروع .

أتقدم بجزيل الشكر والتقدير إلى كل من ساعد على إتمام هذا البحث وقدم العون ومد يد المساعدة وزودنا بالمعلومات اللازمة لإتمام هذا البحث .

كما أتقدم بجزيل الشكر والتقدير وخالص العرفان إلى الهيئة التدريسية في المعهد العالي للعلوم التطبيقية، على إرشادهم لي في تخرجي هذا ، ومساهمتهم في رفع مستوانا بتوجيهاتهم السديدة وارشاداتهم المفيدة .

كما أتوجه بوافر الشكر والتقدير إلى الأستاذ الدكتور **رفيع جبره** على رعايته الجادة لهذا البحث وعلى آرائه الصائبة التي كان لها أكبر الأثر في انجاز هذا العمل بهذه الصورة .

إلى كل من ساهم بإنجاح هذا المشروع بإمداده العون والمساعدة بشكل مباشر أو غير مباشر، على تقديمهم الارشادات التسهيلات لي في اجراء كافة التجارب العملية والاختبارات لهذا المشروع وأخص بالذكر الدكتور **محمود يونس**.

إلى من زرعوا التفاؤل في دربنا وقدموا لنا المساعدات والتسهيلات والأفكار والمعلومات، ربما دون أن يشعروا بدورهم بذلك، فلهم منا كل الشكر .

.

ملخص المشروع :

يتزايد الاهتمام يوماً بعد يوم بتقانة تعدين المساحيق ونخص منها على وجه التحديد المساحيق الكربيدية، ومن الأهمية بمكان التعرف على هذه التقانة وتوطينها في سورية. ويقع هذا البحث في هذا السياق.

يتألف البحث من ثلاثة أجزاء:

الجزء الأول: الدراسة النظرية.

تم بداية التعريف بعلم تعدين المساحيق ومزايا هذه التقانة وحدودها والمخطط التقاني لعمليات التصنيع ومراحله وطرائق إنتاج المساحيق المعدنية والكربيدية وخواصها وكيفية قياسها.

يلي ذلك شرحاً مركزاً لمراحل تقانة تعدين المساحيق، حيث تم التعريف بطرائق كبس المساحيق وبعملية التلبيد بشكل عام والتلبيد في الطور السائل ومراحلها والسيطرة على الجو المحيط في الفرن بشكل خاص وأنواع الأفران المستخدمة.

يليه شرحاً لطرائق التكثيف الساخن كالضغط الساخن المتماثل (Hot Isostatic Pressing HIP) وطرائق حقن المساحيق (Metal Injection Moulding MIM).

أخيراً، تم التطرق إلى ضبط جودة منتجات المساحيق وطرائق توصيفها والتعريف بأهمية الخلائط (مسحوق كربيدي + رابط معدني) وخاصة الخليطة (WC–Co) ومخطط أطوارها واستعراض أبرز الأعمال والمنشورات المتوافرة حول تعدين مساحيق كربيد التنغستن– كوبالت.

الجزء الثاني: المواد والتجهيزات والطرائق.

تم تحضير العينات المخبرية من خليطة كربيد التنغستن والكوبالت انطلاقاً من مساحيقها بنسبة كوبالت قدرها 8% wt إلى 92% wt كربيد التنغستن وإضافة المواد اللازمة لعملية كبس المضغوطات الرطبة (الخضراء) من مزلقات ورابط بوليميري وذلك وفقاً للتطبيقات المعيارية لاستخدامها النهائي كلقم قطع كربيدية (وفقاً لتركيب اللقمة المعيارية).

كما تم في هذا الجزء تحديد الشروط التجريبية المثلى ومعاملاتها لكبس المضغوطات الرطبة (الخضراء) ضمن القالب بما فيها نسب الانكماش للخليطة وتصميم وتصنيع القوالب اللازمة لمرحلة الكبس وفقاً للشروط المحددة، ومن ثم المعالجة الحرارية وتحديد المعاملات المثلى للتلبيد في الطور السائل لتصنيع هذه اللقم.

تم دراسة اللقم المصنعة مجهرياً وبنيوياً وميكانيكياً. ويتضمن هذا القسم المواد المستخدمة في المشروع والأجهزة والأدوات والطرائق.

الجزء الثالث: النتائج العملية.

- تم تحضير ٨ لقم أولية ذات حد قاطع وحيد بواسطة قالب كبس أولي تم تصميمه وتصنيعه خصيصاً لهذا الغرض مزود بكابس علوي وكابس سفلي لتحقيق أعلى تجانس ممكن في الكثافة. كان الهدف الأساس تحديد الانكماش النهائي لهذه العينات الأولية من هذه اللقم الكربيدية بعد التلبيد وفقاً لتركيبها، حيث تم كبسها ضمن القالب تحت ضغوط مختلفة بطريقة الكبس المحوري من الطرفين للحصول على مضغوطات ذات مقطع دائري مجوف. وفي قالب آخر، تم إنتاج عينات أخرى معيارية ذات مقطع مستطيل من أجل اختبار الخواص الميكانيكية.
- تم دراسة مواصفات المضغوطات الرطبة (الخضراء) وإجراء كافة قياسات الأبعاد والأوزان لتحديد الكثافة والمتانة الرطبة (الخضراء).
- تم اجراء عملية التلبيد ضمن أجواء مختلفة (نتروجين – آرغون – خلاء)، وتم الحصول على أفضل النتائج من حيث الشكل والبنية والانكماش وحالة السطح والتشوهات لعينات اللقم المصنعة في جو فرن التخلية (High vacuum) عند درجة حرارة 1300°C وضغط خلاء (5×10^{-3} mbar) ووفقاً لبرنامج زمني محكم لسرعة التسخين وعتبات التثبيت المختلفة وصولاً الى حرارة التلبيد العظمى وسرعة التبريد. استغرق زمن هذه المعالجة الحرارية نحو 14 ساعة. يلي ذلك، استكمالاً لعملية التلبيد في الطور السائل، المتابعة حتى درجة حرارة التلبيد العظمى 1475°C (قرب درجة حرارة انصهار الكوبالت 1493°C) وفقاً لمخطط الأطوار وذلك في فرن قابل للتحكم بأجوائه، بعد غمر اللقم في حاوية غرافيتية مُلئت بمسحوق خامل من المغنيزيا MgO.
- تم قياس أبعاد اللقم الملبدة وأوزانها وكثافتها وقساوتها وحساب نسب الانكماش الحجمية والفاقد الوزني لهذه اللقم بعد التلبيد ومقارنتها بمواصفات بنية اللقمة المرجعية والتأكد من صحة النتائج التي تم الحصول عليها ودقتها ومعرفة وتحديد القيم الأمثل لمعاملات الكبس والتلبيد.

- وكهدف للتصنيع، تم اختيار إحدى اللقم المرجعية لشركة Sandvik السويدية ذات التصنيف المعياري RNMG دائرية الشكل ولها حدَّي قطع من كلا الوجهين.
- تم مسح أبعاد اللقمة المحددة بدقة ورسم مجسمها وادخال معامل الانكماش الذي تم تحديده في الاعتبار.
- تم تصميم وتصنيع القالب النهائي لكبس اللقمة المحددة على نحو دقيق وبطريقة الكبس المحوري من الجهتين وفقاً للمخططات المبينة.
- تم اعداد وتحضير الخلطة المكونة من: مسحوق كربيد التنغستن + كوبالت + مادة رابطة بوليميرية PVA + مادة تزليق Zn Stearate وفق نسب مدروسة ومزجها وتكتيلها وتجفيفها وتحديد الوزن اللازم من المسحوق لكبس اللقمة.
- تم كبس اللقم النهائية على مكبس استطاعة 50 طن بواسطة القالب الجديد في مجال الضغط الأنسب بين 20-15 طن (بحدود 600 ميغا باسكال).
- تجفيف اللقم لمدة ٢٤ ساعة ثم اجراء عملية التلبيد وفق برنامج التلبيد على مرحلتين.

١- التلبيد في درجة الحرارة 1300 °C في فرن الخلاء لمدة 60 دقيقة عند ضغط خلاء (0.5 Pa).

٢- المتابعة في الفرن الكتيم عند درجة حرارة 1475 °C لمدة 60 دقيقة ضمن حاوية غرافيتية مملوءة بمسحوق MgO .

- بعد عملية التلبيد، تم إجراء عدة اختبارات على هذه اللقم(الكثافة الحقيقية والنسبية والمسامية) واختبار مقاومة الانعطاف والقساوة الماكروية للكربيد الملبد Cemented Carbide.
- تم التأكد من نسب الانكماش الحجمية والفاقد الوزني التي تم رصدها سابقاً والتي انعكست على منتج اللقمة النهائية حيث تم التطابق في الوزن والحجم والأبعاد بين منتجنا المحلي واللقمة المعيارية لشركة ساندفيك.
- أعطت العينات التي شُكلت تحت ضغط 660 MPa -600 ولبِّدت عند 1475 °C لمدة ساعة على مرحلتين (<u>الطور الأول</u> عند 1300 °C في فرن الخلاء + <u>الطور الثاني</u> عند 1475 °C ضمن حاوية غرافيتية ومسحوق خامل) أفضل النتائج التي تجاري اللقمة المرجعية من حيث التركيب الكيميائي النهائي والخصائص المغناطيسية والكثافة والقساوة والمتانة والبنية البلورية والشكل العام دون تشوه.

الفصل الأول

الدراسة النظرية

الفصل الأول
الدراسة النظرية

١-١ مقدمة عامة

يتطلب تشغيل المعادن المتنوعة أدوات قطع عالية القساوة والمتانة والأداء. ولهذا الغرض، استخدم في البداية أدوات القطع المصنعة من فولاذ سريع القطع (High Speed Steel HSS) ولكنها لم تلبِّ الحاجة الملحّة في الصناعة لتشغيل أطياف واسعة من المعادن والخلائط المعدنية اللاحقة. ظهرت أدوات القطع الكربيدية أو ما يعرف باللقم الكربيدية مع بداية انتاج كربيدات التنغستن في منتصف القرن العشرين. وتم تطوير صناعة اللقم في نهايات القرن العشرين مع ظهور أفران الخلاء وتقانات الطلاء المتطورة. يتم تصنيع هذه اللقم من مساحيق مركبة تتضمن مواد فائقة القساوة من الكربيدات المعدنية المتنوعة مثل MoC–WC–TiC مع مادة رابطة معدنية لدنة مطيلية تدعى المادة الرابطة Binder وعادة ما تكون من النيكل أو الكوبالت وذلك بإحدى تقانات تعدين المساحيق (Powder Metallurgy P/M) المعروفة. سمِّي هذا المنتج الكربيد الملبد (Cemented carbides) الذي يتميز بمواصفات فريدة من حيث المقاومة الممتازة للتآكل والمتانة الجيدة وعمر الخدمة الطويل وثباتية الأبعاد والقساوة العالية ضمن مجال عمل حراري واسع يمتد حتى 900°C.

يرتبط موضوع هذا البحث بالعديد من المصطلحات الفنية الخاصة بتعدين المساحيق والكربيدات وطرائق وتقانات تصنيعها المختلفة التي أصبحت من الطرائق الاقتصادية ذات الانتاجية العالية وخاصة عند تصنيع القطع الدقيقة. كما يرتبط بعدد من الاختبارات المختلفة التي تقيِّم خواص المنتجات النهائية والتي تتطلب مراحل تصنيعها خبرة تقانية ومهارات كبيرة.

تسمح هذه التقانة بانتاج جيل جديد من المواد المركبة متعددة الأطوار ذات مجموعة متنوعة من الخصائص تتجاوز بكثير خصائص المواد التقليدية وبشكل اقتصادي عبر تقانات تعدين المساحيق .

إن التحكم بمجمل العوامل المختلفة لهذه التقانة مثل: التركيب الكيميائي للمزيج وحجم حبيبات المسحوق وشكلها وتوزعها وضغط الكبس ودرجة حرارة وزمن التلبيد وأجواء التلبيد والمعالجة

الحرارية اللاحقة يلعب دوراً حاسماً في نجاح المنتج النهائي وتحديد خواصه المرغوبة مثل:

- مقاومة الاهتراء (القساوة)،
- مقاومة الصدم،
- مقدار التشوهات في شكل المنتج والمسامية،
- جودة السطوح وحالتها (أكسدتها)،
- الانكماشات الهندسية (يمكن أن تصل حتى 40%) وانتظامها في المنتج،
- الكثافة النهائية وتجانسها في المنتج.

وحسب استخداماتها المتنوعة لتشغيل أطياف واسعة من المعادن، يطبق على معظم اللقم الكربيدية معالجات سطحية لأغراض محددة بالطلاء أحادي أو متعدد الطبقات من نتريد التيتانيوم والألومينا باستعمال تقانة التوضع الفيزيائي للبخار (Physical Vapor Deposition PVD) أو التوضع الكيميائي للبخار (Chemical Vapor Deposition CVD). يمكن تناول هذا الموضوع ضمن مشروع بحث لاحق يستكمل فيه مشروع تصنيع اللقمة الكربيدية حتى مراحله النهائية.

١-٢ أهداف المشروع وأهميته :

- تحتاج السوق المحلية بفرعيها القطاع العام والخاص على السواء لكميات هامة من أدوات القطع الكربيدية اللازمة لتشغيل المعادن والخلائط. يتم تأمين هذه اللقم عن طريق الاستيراد فقط ومن شركات عالمية كبرى مثل شركتي Guhring– Sandvik وبأسعار باهظة.
- يهدف هذا المشروع إلى تمهيد الطريق لوضع المنهجية والأسس العلمية لتصنيع بعض هذه الأدوات واللقم عبر تصنيعها مخبرياً وبالجودة العالمية المطلوبة لذلك، سيما وأن بعض العمليات التشغيلية تتطلب أشكالاً غير تجارية من هذه الأدوات واللقم ذات خصوصية لبعض الأعمال.
- نقل وتوطين تقانة تعدين المساحيق المعدنية والكربيدية إلى القطر.

موجز عن دراسة مرجعية محلية سابقة

- أجريت بعض الدراسات النظرية في مشروع سابق حول مجال تعدين المساحيق وتم فيها استعراض الطرائق المختلفة في إنتاج المساحيق وتذريرها والتقانات المتبعة في تصنيع وإنتاج المضغوطات الرطبة (الخضراء) (Green compacts) إضافة إلى تحضير بعض خلطات المساحيق المعدنية ودراسة خواصها وتوصيفها بواسطة بعض الاختبارات.
- من جهة أخرى، تم اجراء بعض الاختبارات التمهيدية المشجعة في مجال تحضير وتجهيز بعض القطع المختلفة المعدنية والكربيدية والسيراميكية وذلك بالاستعانة ببعض المراجع والنشرات الفنية والكاتالوجات للشركات الكبرى المختصة في هذا المجال مثل شركة Sandvik .
- يختلف هذا البحث عن مثيلاته السابقة كون المساحيق المستخدمة في التصنيع عبارة عن مواد مركبة من مسحوق كربيد التنغستن WC القاسي + مادة معدنية رابطة لدنة هي الكوبالت Co ما يمثل تركيب المنتج النهائي. ومن أجل امكانية الربط المبدئي لحبيبات المسحوق المضغوطة في القالب وصولاً الى أفران التلبيد تم استخدام رابط بوليميري مركب من (بولي فينيل اسيتات PVAc + بولي ايتيلن غليكول PEG) من أجل الحصول على قطع ذات متانة رطبة (خضراء) كافية.
- تتميز عملية التلبيد في هذه الدراسة مقارنةً مع الدراسات السابقة التي اعتمدت على التلبيد في الطور الصلب بأنها تعتمد على التلبيد في الطور السائل (Liquid Phase Sintering) حيث تصل درجة حرارة التلبيد إلى (1475 °C) أي إلى حدود عتبة انصهار المعدن الرابط (الكوبالت) (1493 °C) الذي يتغلغل مصهوره بين حبيبات الكربيد ويربطها مع بعضها ويشكل الطور الرابط (matrix) في البنية ويملأ المسامات المتبقية رافعاً الكثافة النهائية نحو قيم قريبة من قيم الكثافة النظرية للكربيدات.

١-٣ علم تعدين المساحيق (Powder metallurgy).

وهو عبارة عن تقنية تشكيل المنتجات بأشكالها النهائية عبر كبس أو حقن مسحوق معدني أو كربيدي ناعم تحت ضغط عالٍ إلى شكل وأبعاد قريبة من المنتج النهائي في قالب معدني مصمم لهذا الغرض وتسخين المضغوطة المشكلة لفترة زمنية محددة إلى درجة حرارة أقل من درجة حرارة انصهار أحد مكونات مزيج المسحوق الأساسية على الأقل، وهذا ما يعرف بالتلبيد.

المواد الأولية : مسحوق معدني + إضافات.

التشكيل: إحدى طرائق الكبس ضمن قالب.

التلبيد : في الفرن دون الانصهار الكامل ضمن جو محدد.

١-٤ مزايا التصنيع بطريقة تعدين المساحيق.

- إمكانية إنتاج منتجات صعبة التشكيل بالطرائق التقليدية للتشكيل والتشغيل،
- الضبط الدقيق للأبعاد والخواص: حيث تلائم خصائص المنتجات النهائية المتطلبات الوظيفية للتطبيقات الصناعية، ويمكن الحصول على دقة أبعاد بحدود 100μ عند تحديد مقادير انكماش المضغوطات بشكل مدروس،
- إمكانية تركيب الخليطة المطلوبة حسب الحاجة،
- التحكم في بعض الخواص الفيزيائية بسهولة مثل: المسامية ؛ الكثافة ؛ المغناطيسية وتغيرها في المنتج،
- تحقيق الشكل النهائي للمنتجات المصنعة مما يوفر ويحد من عمليات التشغيل أو الانهاءات والتشذيب،
- انخفاض نسبة الفقد للمادة حيث أن 97% من المسحوق يتحول إلى منتج نهائي،
- توفير إمكانية واسعة لتنويع تركيب الخلائط المعدنية واللامعدنية مثل خلائط (غرافيت + نحاس) – (كربيد + معدن) ....الخ،

- إمكانية أتمتة العملية بكاملها من المسحوق إلى المنتج النهائي وجعلها ذات كفاءة إنتاجية عالية.

١–٥ عيوب استخدام طريقة تعدين المساحيق ومحدوديتها.

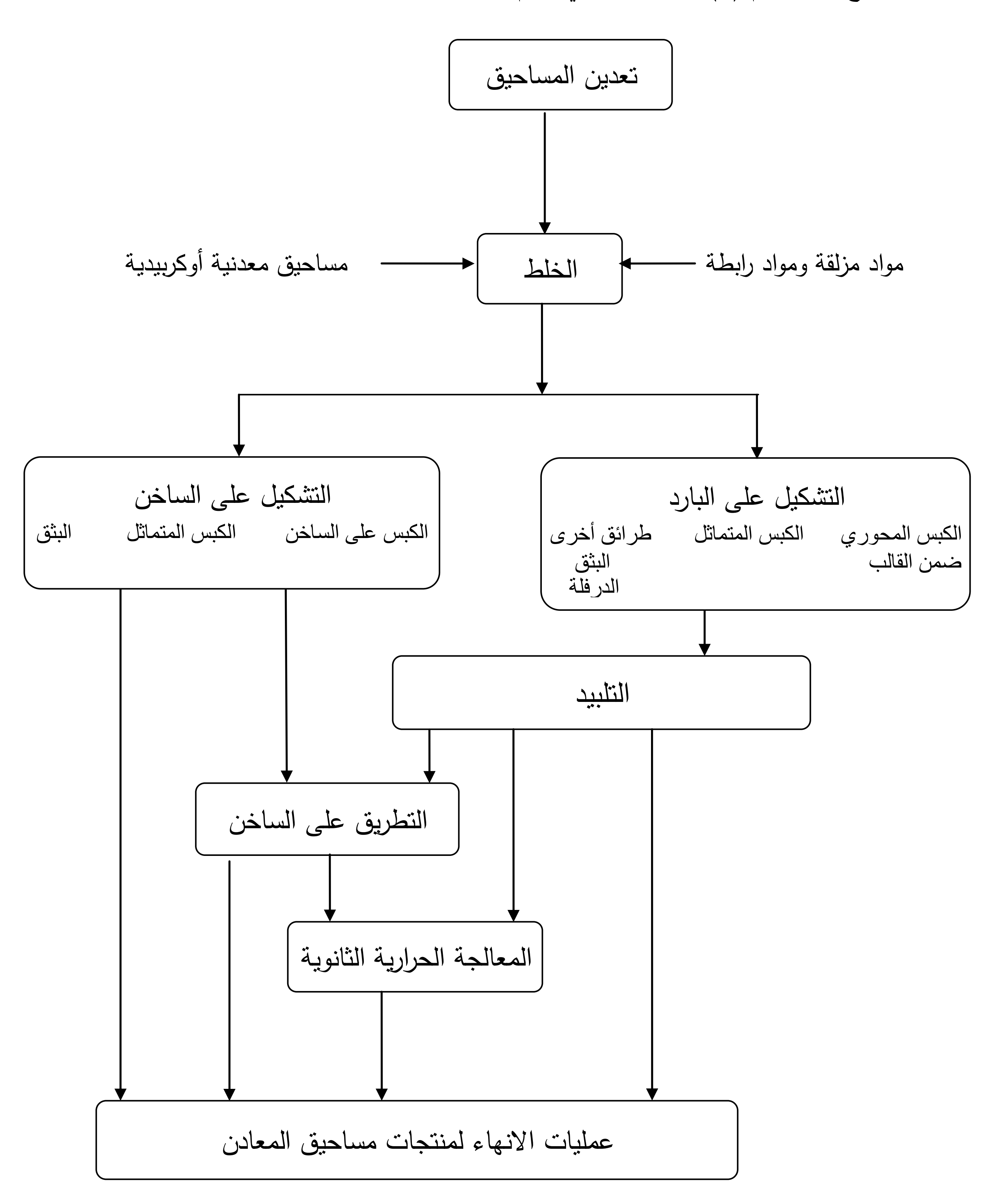
- الكلفة العالية للتجهيزات والأدوات والقوالب المستعملة،
- الأسعار المرتفعة لبعض المساحيق المعدنية،
- مشاكل تخزين ومعالجة مساحيق المعادن مثل: خطر احتراق أو انفجار بعض المساحيق المعدنية – التقادم،
- التباين في الكثافة والحجم لحبيبات المساحيق المختلفة،
- صعوبة إنتاج القطع المعقدة الشكل بسبب نقص سيولة وانسيابية المسحوق مقارنة بالمعدن المصهور،
- حجم منتجات محدود نسبياً نظراً لاحتياجها لقوى كبس كبيرة.

١–٦ المواد الأولية المستخدمة في تعدين المساحيق .

- مساحيق المعادن (Fe, Cu ,Al ,Ni ,Co ,Ti ,W ,Mo) وغيرها،
- الخلائط المعدنية مثل خلائط البرونز Bronze والفولاذ سريع القطع HSS والفولاذ المقاوم للصدأ Stainless steel،
- المساحيق غير المعدنية مثل الغرافيت Graphite وكربيدات المعادن Metal Carbides مثل كربيد التنغستن WC وأكاسيد المعادن مثل الألومينا A_2IO_3 وغيرها،
- مواد رابطة عضوية (Binders) مثل polyvinyl acetat, cellulose , polyvinyl alcohol , polyacrylates, (PEG)Polyethylene glycol, مذيبات عضوية مستخدمة للمساعدة في ربط الحبيبات الكربيدية أو السيراميكية،
- بعض المواد المزلقة لرفع انسيابية المسحوق في القوالب مثل المركبات الشمعية (البارافين – ستيارات الزنك او الليثيوم) أو المركبات الشحمية (الجليسرين) أو الغرافيت.

١-٧ المخطط التقاني لتعدين المساحيق.

يوضح الشكل رقم (١) المخطط التقاني العام لتعدين المساحيق.



الشكل (١) – المخطط التقاني لتعدين المساحيق [1].

١-٨ **الخطوات الأساسية في تعدين المساحيق** (Powder Metllurgy processes).

١- إنتاج المساحيق المعدنية،
٢- إعداد تركيبة الخلطة المرغوبة ومزج المسحوق،
٣- كبس المسحوق،
٤- التلبيد بالتسخين (Sintering)،
٥- التوصيف والاختبار.

١-٩ إنتاج المساحيق المعدنية.

تختلف الطرائق المتبعة في الحصول على المساحيق المعدنية باختلاف طبيعة المعدن وحالة تواجده وطبيعة المساحيق المراد تحضيرها والخواص التي يجب أن تتوافر فيها، إضافةً إلى خواص القطع النهائية التي ستنتج من هذه المساحيق.

هناك عموماً ثلاث طرائق لإنتاج المساحيق المعدنية:

١- الطرائق الكيميائية،
٢- الطرائق الفيزيائية،
٣- الطرائق الميكانيكية.

١-٩- ١ الطرائق الكيميائية.

أ- **الإرجاع الكيميائي** (chemical reduction): وهي أكثر الطرائق الكيميائية شيوعاً لغزارة إنتاجها وقلة تكاليفها، حيث يمكن الحصول على المساحيق المعدنية من أكاسيدها مباشرة، إذ يتم أولاً طحن أكسيد المعدن إلى جسيمات ناعمة نسبياً تُرجع فيما بعد بخلطها مع عنصر مرجع صلب مثل الكربون أوالصوديوم أوالمغنزيوم أو غازي مثل الهيدروجين وأول أكسيد الكربون وغاز النشادر.

وعلى سبيل المثال، يتم الحصول على مسحوق الحديد من إرجاع أكسيد الحديد المغناطيسي Fe_3O_4 مع الكربون وفق المعادلة التالية:

$$Fe_3O_4 + 2C \longrightarrow 2CO_2 \uparrow + 3Fe \downarrow$$

ب – التفكك الكيميائي للمركبات (chemical decomposition of compounds): وتُصنف إلى قسمين حسب طريقة الإنتاج:

ب –١ : تفكك هيدريدات المعادن: وهي تضم أولاً هيدريدات المعادن المنصهرة مثل Ti , ZR , V , Th , U عن طريق تسخين المعدن وهو على شكل اسفنجي أو رقاقات. يتشكل TiH_2 مثلاً من التيتانيوم في المجال الحراري بين 300– 500°C وتكون هذه الهيدريدات هشة وقصفة تماماً ويمكن طحنها بسهولة إلى مسحوق وفق النعومة المطلوبة وإعادة تسخينها من جديد في جو مفرغ من الهواء لتخليصها من الهيدروجين والحصول على حبيبات ناعمة من المعدن النقي ذات قابلية للكبس والتلبيد.

ب –٢ : تفكك كاربونيل المعادن : كمثال مشهور على هذه الطريقة نذكر إنتاج مسحوق النيكل والحديد على النحو التالي:

$$\mathrm{Fe} + 5\mathrm{CO} \xrightarrow[\text{حرارة من } 200-220\ ^\circ\mathrm{C}]{\text{ضغط } 70-200\ \mathrm{atm}} \mathrm{Fe(CO)_5}$$

$$\mathrm{Fe(CO)_5} \xrightarrow[\text{حرارة من } 150-400\ ^\circ\mathrm{C}]{\text{ضغط + تذرية}} \mathrm{Fe\ (Powder)} + 5\mathrm{CO}$$

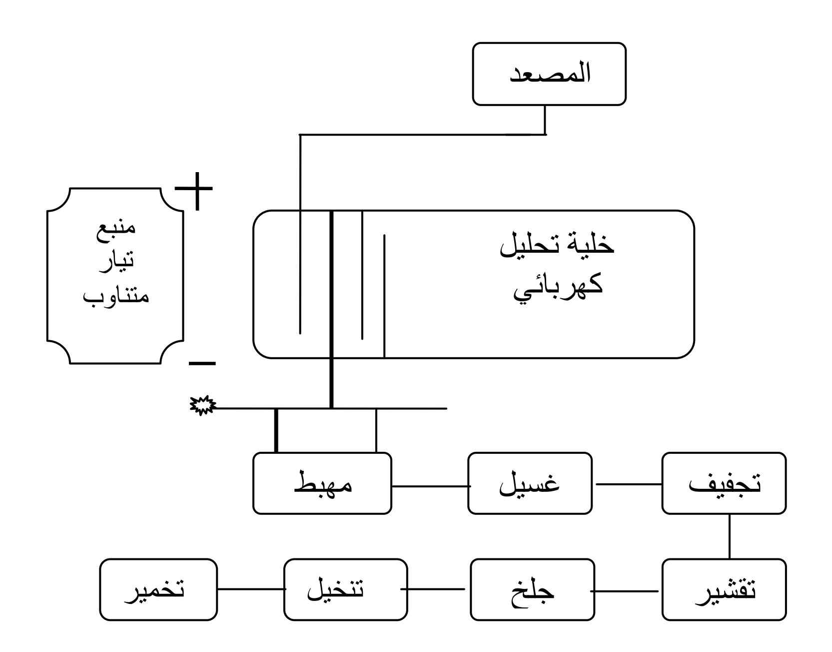
يكون مسحوق الحديد الناتج كروي الشكل ومتوسط النعومة (أقل من 10 µ) ، في حين يكون مسحوق النيكل ذا شكل غير منتظم ومسامي وناعم.

١–٩– ٢ الطرائق الفيزيائية.

أ – طريقة التحليل الكهربائي (Electrolyte Method).

إن أكثر الطرائق الفيزيائية شيوعاً للحصول على المساحيق المعدنية هي طريقة التحليل الكهربائي التي تتم باستعمال المحاليل المائية لأملاح المعادن أو الاملاح المعدنية المصهورة لبعض المعادن النادرة. يتم التحليل في حوض يحوي محلولاً مائياً لأحد أملاح المعدن المراد إنتاجه ويكون المصعد مصنوعاً من هذا المعدن. وبإمرار التيار المناسب، تبدأ ذرات المصعد بالتشرد في المحلول لتنتقل وتترسب على المهبط على شكل صفائح هشة سهلة التفتيت أو على شكل حبيبات ناعمة يختلف حجمها باختلاف كثافة التيار الكهربائي المستخدم. ويمكن بالتحليل الكهربائي

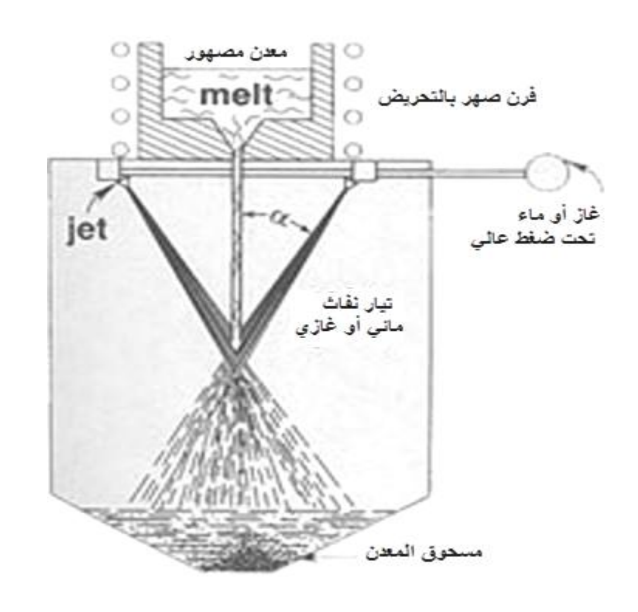
الحصول على جميع مساحيق المعادن تقريباً، غير أن هذه الطريقة ذات إنتاجية منخفضة نسبياً وتقتصر على استحصال مساحيق نقية خالية من الشوائب لبعض المعادن كالنحاس والفضة والحديد والنيكل أو في الحصول على بعض المعادن النادرة مثل الزركونيوم والثوريوم والتيتانيوم.



الشكل (٢) – المخطط التقاني لعملية التحليل الكهربائي للحصول على مساحيق المعادن [2].

ب – التذرية (Atomizing).

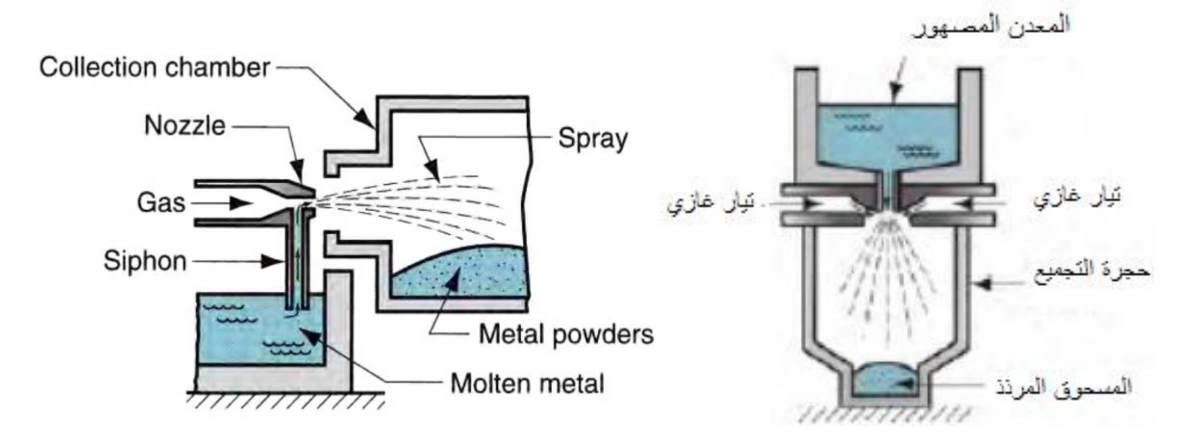
التذرية هي عبارة عن بعثرة السائل على شكل قطرات عبر إجبار المصهور على الخروج من خلال صمام ذي فتحة مصممة بدقة. إن أي مادة متوافرة في الحالة المنصهرة يمكن تذريتها والحصول، بالتبريد، على قطرات صلبة. وبهذه الطريقة، يمكن تحويل أي مادة تم صهرها إلى مسحوق. وتعدُّ هذه العملية ذات إنتاجية كبيرة ومنتشرة على نطاق واسع ولا سيما لإنتاج المعادن عالية النقاوة. ويبين الشكل (٣) مخطط مبدأ عملية التذرية.



الشكل (٣) – مخطط مبدأ عملية التذرية [2].

وتصنف التذرية الى ثلاث طرائق:

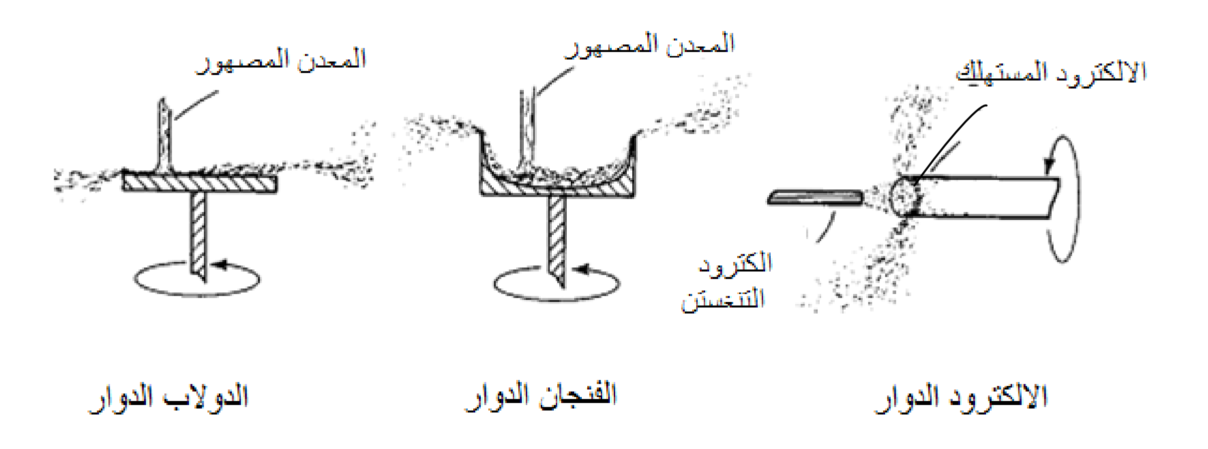
ب١- التذرية الغازية: ويستخدم فيها غاز النتروجين والأرغون أو الهواء كوسيلة تذرية ويوضح الشكل (٤) مبدأ هذه الطريقة حيث يتم تحويل المعدن المنصهر إلى قطرات صغيرة عند اصطدامها بتيار من الغاز عالي الضغط.



الشكل (٤) – مبدأ طريقة التذرية الغازية [2].

ب٢- التذرية السائلة: يشكل الماء أو الزيت هنا تيار التبريد، حيث يتم تحويل المعدن المنصهر بالبخ إلى قطرات صغيرة تتصلب لدى اصطدامها بتيار من الماء عالي الضغط. تتطلب هذه الطريقة طاقة كبيرة لتزويد الماء بالضغط اللازم.

ب٣- التذرية بالطرد المركزي: يتم تحويل المعدن المنصهر الى قطرات صغيرة بواسطة قوة الطرد المركزي الناجمة عن الدوران بسرعة كبيرة لقرص أو فنجان أو الكترود كما في الشكل (٥).



الشكل (٥) – طرائق التذرية بالطرد المركزي [2].

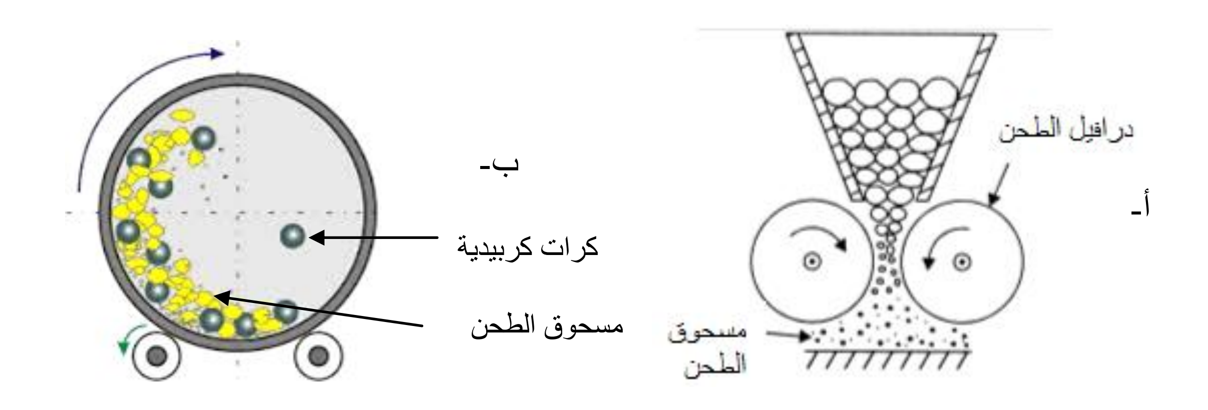
١-٩- ٣ الطرائق الميكانيكية.

تعدُّ هذه الطرائق قليلة الشيوع مقارنةً مع الطرائق السابقة لإنتاج المساحيق المعدنية. ولعل أهمها هي السحق الميكانيكي عبر إحدى الطرائق التالية: الصدم ، القص، والضغط. يعتمد تشكيل مساحيق المعادن بالطرائق الميكانيكية على تركيبات مختلفة أو مدمجة من هذه الطرائق الأساسية، وأكثرها شيوعاً هي المطحنة ذات الكرات والمطحنة ذات المحور الدوار والمقاومة العالية للاحتكاك. وتستخدم هذه الطرائق في الحالات التالية :

- المعادن سهلة التفتيت مثل الانتيموان والبيزموت و المعادن الهشة والقاسية نسبياً،
- المعادن الفعالة مثل البيريليوم وهيدرات المعادن.

يمكن استخدام هذه الطرائق للمعادن الشائعة الاستخدام مثل الألمنيوم والحديد عندما يكون المسحوق مطلوباً بشكل صفائحي أو بدرجة نعومة محددة.

يبين الشكل رقم (٦) طريقتي الطحن: أ – بالسحق ؛ ب- باستخدام الكرات القاسية [3, 2].



الشكل (٦)- طريقة الطحن: أ- بالسحق ب- بالكرات القاسية Ball mill.

١-١٠ خواص مساحيق المعادن وكيفية قياسها.

يعتمد نجاح عمليات تعدين المساحيق إلى حدٍ كبير على خواص المساحيق المعدنية المستخدمة ودرجة التحكم الدقيق بها. نتناول فيما يلي أبرز هذه الخواص.

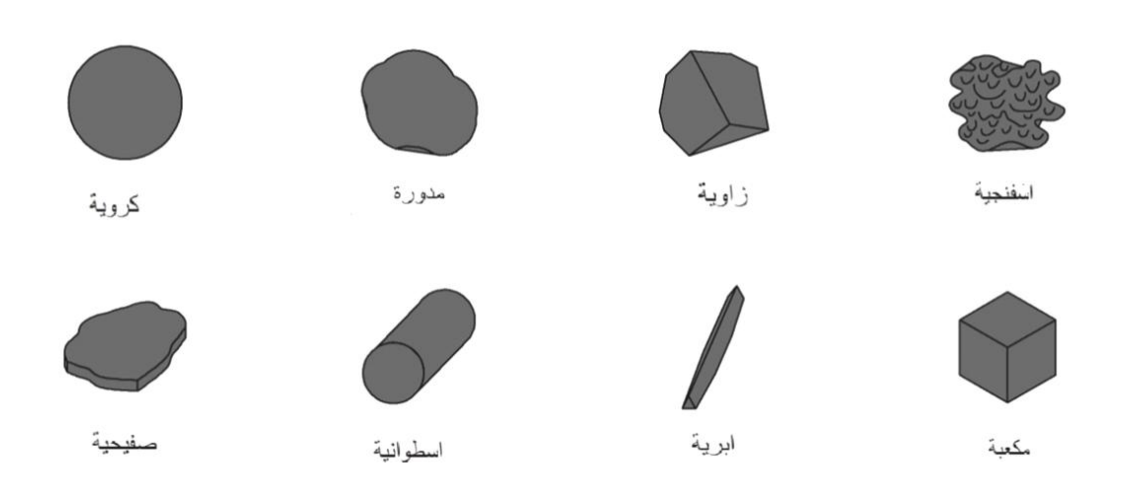
أ- التركيب الكيميائي والبنية.

تؤثر مستويات الشوائب المتواجدة في المساحيق المعدنية تأثيراً هاماً في المعالجة وخواص المنتج النهائي. ومن الضروري معرفة حالة الشوائب فيما إذا كانت عنصراً نقياً أم مركباً كيميائياً. فشائبة الأوكسجين شائعة في المساحيق المعدنية التي تُرجع أكاسيدها بالهيدروجين. كما لا يمكن اغفال قابلية ادمصاص المساحيق المعدنية كمية من الغازات وبخار الماء من الجو المحيط أثناء التخزين مما يشكل طبقة من الأكاسيد على سطح المساحيق ويؤثر بالنهاية على المضغوطات والتلبيد.
ويتزايد مقدار التلوث مع تناقص حجم الحبيبات وزيادة النشاط الكيميائي للسطح.

وتؤثر البنية المجهرية للمسحوق المتبلور في سلوك المعدن أثناء الضغط والتلبيد وعلى الخواص النهائية للمنتج، حيث تكون نعومة حجم الحبيبات مرغوبة دوماً لأنها عامل يحسِن الخواص الميكانيكية وقابلية التلبيد وانتظام نسب مقادير الانكماش عموماً.

ب- حجم الحبيبات وشكلها.

هناك عدة أشكال رئيسة للمساحيق المعدنية ثلاثية الأبعاد كما هو موضح في الشكل (٧). وتعدُّ الحبيبات ذات الشكل الكروي هي الشكل المثالي البسيط، بينما تختلف الحبيبات المسامية عن الحبيبات غير المنتظمة بسبب وجود المسامية التي يمكن بحد ذاتها أن تتباين بالشكل والحجم. وفي حالة وجود عدد كبير من المسامات يكون توصيف المسحوق أمراً صعباً جداَ. وكذلك، يتباين حجم الحبيبات ضمن مجال واسع، حيث تتراوح أبعاد الحبيبات من 0.001- 1 mm. يكون لحجم الحبيبات وتوزيع حجومها تأثيراً كبيراً في سلوك مساحيق المعادن خلال المعالجة ويتحكم، بالتالي، لحدٍ كبيرٍ في خصائص المنتجات النهائية المصنوعة من المسحوق. بناءً على ذلك ، يعدُّ توصيف هذه الخصائص أمراً ضرورياً.

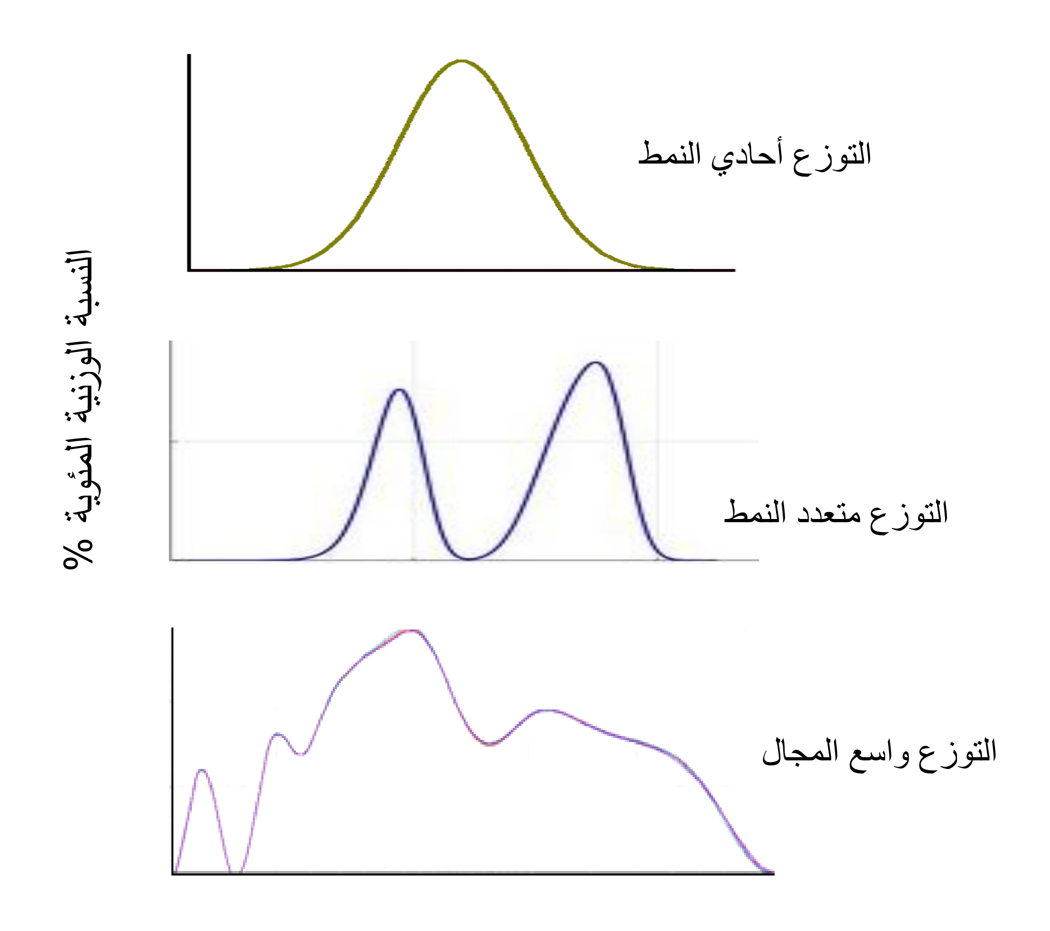


الشكل (٧)- الأشكال الرئيسة لمساحيق المعادن [3].

تربط منحنيات التوزع الحجمي للحبيبات بين حجم الحبيبة ونسبتها المئوية الوزنية في المسحوق. وهناك عدة أشكال رئيسة للتوزع الحجمي للحبيبات كما يظهر الشكل (٨)، حيث يبين الشكل الأول التوزع أحادي النمط unimodal distribution ، إذ تظهر قمة واحدة تمثل الكمية العظمى من حجم معين. يبين الشكل الثاني التوزع متعدد النمط polymodal distribution، حيث تتوزع أبعاد الحبيبات حول إثنين أو أكثر من النطاقات الضيقة لأبعاد الحبيبات وانعدام وجودها تقريباً بين هذه النطاقات.

يبين الشكل الثالث التوزع واسع المجال broad band distribution، حيث يكون هناك تركيز منتظم لأبعاد الحبيبات حول مجال معين مع عدم وجود حبيبات خارج هذا المجال عملياً.

يمثل هذا التوزع غير المنتظم لأبعاد الحبيبات عملياً توزعاً مستمراً ومحدوداً لأبعاد الحبيبات ضمن مجال واسع نسبياً.



الشكل (٨)- مخطط توضيحي للتوزعات الواقعية لحجوم الحبيبات [4].

تستخدم بشكل واسع في التطبيقات العملية والتجارية لتصنيع المساحيق المعدنية طريقة القياس الميكانيكية لأبعاد الحبيبات باستعمال المناخل الهزازة التي لا توفر فقط قياس أبعاد الحبيبات، بل وفصل أو فرز المساحيق عن بعضها إلى أجزاء مختلفة النعومة.

ويتم بهذه الطريقة عادة تنخيل كمية من المسحوق المعدني مقدارها 50 g، حيث توضع سلسلة من المناخل فوق بعضها البعض بالتدريج بحيث يكون المنخل ذو الفتحة الأكبر في الأعلى ويكون المنخل ذو الفتحة الأصغر في الأسفل، ثم توضع عينة المسحوق المعدني في الأعلى وتغطى وتربط المناخل مع بعضها شاقولياً بطريقة ميكانيكية ويتم تطبيق اهتزاز أو دوران على مجموعة المناخل لمدة محددة من الزمن، ثم يتم فصلها عن بعضها ووزن الكمية المتبقية على كل منخل على حده. يتم بعدها حساب النسبة المئوية للكمية المتبقية في كل منخل وتمثيلها بيانياً.

يبين الجدول رقم (١) تصنيف المناخل المستخدمة في تعدين المساحيق وفقاً للمواصفة الأمريكية القياسية رقم ASTM–E11 [1, 4].

الجدول(١)– تصنيف المناخل المستخدمة في تعدين المساحيق– المواصفة الأمريكية القياسيةASTM–E11.

sieve designation "mesh"	فتحة المنخل Standard	
	μm	(in.)
No. 30	600	0.0234
No. 35	500	0.0197
No. 40	425	0.0165
No. 45	355	0.0139
No. 50	300	0.0117
No. 60	250	0.0098
No. 70	212	0.0083
No. 80	180	0.0070
No. 100	150	0.0059
No. 120	125	0.0049
No. 140	106	0.0041
No. 170	90	0.0035
No. 200	75	0.0029
No. 230	63	0.0025
No. 270	53	0.0021
No. 325	45	0.0017

ت – تضاريس سطح الحبيبة (Particle surface Geometry) :

تعدُّ طبيعة سطح الحبيبات المنفردة من الخواص الهامة للمسحوق، فالحبيبة كروية الشكل مثلاً قد تبدو من الخارج ناعمة لكن الفحص الدقيق بتكبير عالٍ يظهر حقيقة وجود خشونة ونتوءات متعددة على السطح. وهنا تجدر الاشارة إلى أن المساحيق المنتجة بطريقة الإرجاع الكيميائي تكون ذات سطح عالي الخشونة، وبالمقابل، يكون مسحوق المعدن المنتج بطريقة التذرية جيد النعومة.

يمكن للفحص بالمجهر الالكتروني الماسح (SEM) أن يظهر تضاريس السطح وفحص تلوث سطوح الحبيبات وتكتلها.

تؤثر طبيعة تضاريس السطح في قوى الاحتكاك بين الحبيبات وهو أمر هام خصوصاً عند تدفق

المسحوق لتعبئة القوالب وأثناء الانضغاط والتشكيل وتحقيق درجة من التماس بين سطوح الحبيبات خلال التلبيد. من جهة أخرى، سيزداد نشاط التفاعل الكيميائي مع زيادة خشونة السطح وسطحه النوعي ولا سيما في حالة المسحوق غير منتظم الشكل.

ث – مساحة السطح (Surface Area).

يسمّى السطح النوعي للمسحوق مقدار سطح واحدة الكتلة من حبيباته على تماس مع الجو المحيط، ويُعدّ هذا المقدار واحدة من خواص المسحوق الهامة. وحيث أن تفاعلية أي تفاعل بين الحبيبات يبدأ عند السطح، فإن السطح النوعي يؤثر بشدة في قابلية التلبيد .
فمن أجل شكل حبيبات غير منتظم مع سطح ذي درجة خشونة عالية، تكون مساحة السطح النوعي المميز كبيرة جداً للمسحوق وتستخدم طريقة إدمصاص الغاز وتدعى (Brunauer Emmett Teller BET) لقياس مساحة السطح النوعي للمسحوق.

ج – الكثافة الظاهرية (Apparent Density).

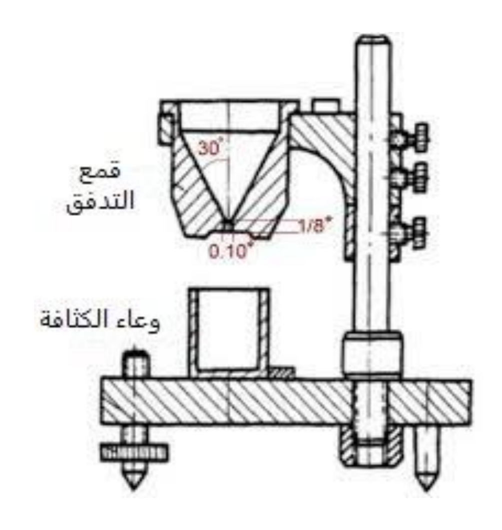
تعرف الكثافة الظاهرية بأنها وزن واحدة الحجم من المسحوق الحر وتقدر بواحدة (g/cm^3)، ويُعدّ تحديد الكثافة الظاهرية من العوامل المهمة في تقانة تعدين المساحيق كونها إحدى أهم خواص المسحوق للأسباب التالية:

- تحدد حجم قالب وأدوات الكبس (شوط الملء) ومقدار شوط حركة المكبس اللازمة لكبس وتكثيف المسحوق،
- تحدد اختيار الآلات المستخدمة في نقل المسحوق الأولي ومعالجته ،
- تؤثر في سلوك المسحوق خلال التلبيد.

أما العوامل المؤثرة في الكثافة الظاهرية فهي كثافة المادة الصلبة للمسحوق وحجم الحبيبات وشكلها والتوزع الحجمي للحبيبات ومساحة السطح وخشونته. وعلى العموم، تتعلق الكثافة الظاهرية بأبعاد وتوزع أبعاد الحبيبات وتتناقص عندما تكون الحبيبات أقل كروية وانتظاماً ومع زيادة خشونة السطح.
يتم التحكم بالكثافة الظاهرية في كثير من الأحيان من خلال خلط أبعاد مختلفة من الحبيبات.

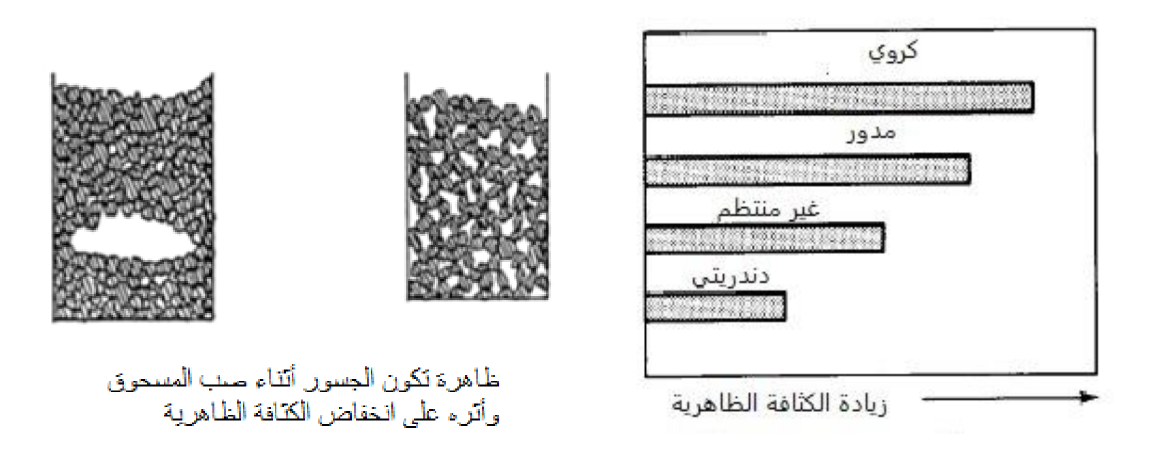
يتم قياس الكثافة الظاهرية بواسطة جهاز تدفق هول (Hall Flowmeter)، حيث يتم وضع المسحوق في قمع والسماح له بالتدفق إلى وعاء حجمه ($25\ cm^3$) حتى الامتلاء الكامل. ويمكن تطبيق اهتزاز أو رج خفيفين على القمع لتسهيل تدفق المسحوق، كما يتم مسح فائض المسحوق بواسطة أداة مستوية. بعد ذلك، يتم وزن المسحوق بواسطة ميزان دقته ($0.01\ g$) وتقسيم الكتلة بالغرام على الحجم ($V=25cm^3$) ($\rho = m/v$)، حيث نحصل على قيمة الكثافة الظاهرية للمسحوق [4].

يوضح الشكل (٩) رسماً تخطيطياً لهذه الطريقة.



الشكل (٩)- جهاز قياس الكثافة الظاهرية للمساحيق Hall Flowmeter [1] .

ويؤثر عامل القطر الوسطي للحبيبة في قيمة الكثافة الظاهرية، بحيث تزداد الكثافة كلما كان القطر الوسطي للحبيبة أقل والعكس بالعكس. يوضح الشكل (١٠) تأثير شكل الحبيبة في قيم الكثافة الظاهرية للمسحوق [5].



الشكل (١٠)- تأثير شكل الحبيبات في الكثافة الظاهرية للمسحوق [5].

ح- الكثافة الرطبة (الخضراء) (Green density).

تعد الكثافة الرطبة (الخضراء) عاملاً هاماً يعبر عن خواص المضغوطات الرطبة (الخضراء) بعد الكبس. وعلى العموم، تتأثر الكثافة الرطبة (الخضراء) للمضغوطات وتزداد مع العوامل التالية:

- زيادة ضغط الكبس عند التشكيل ضمن القالب،
- زيادة الكثافة الظاهرية،
- انخفاض قساوة حبيبات المسحوق،
- تناقص معدل سرعة الكبس.

ويمكن أن تتأثر الكثافة الرطبة (الخضراء) ايجابياً مع استخدام حبيبات لدنة وعالية النعومة ومنتظمة الشكل وذات كثافة عالية (لا تحوي مسامية داخلية متصلة).

خ- سرعة الانسيابية (Flow Rate).

تتطلب الانتاجية العالية لمنتجات وقطع المساحيق المعدنية سرعة تدفق عالية من أوعية التخزين إلى القوالب، وتعتمد طريقة تقدير سرعة الانسيابية على جهاز هول (Hall Flowmeter) السابق ذكره، حيث يتم قياس الزمن اللازم لمرور 50 g من المسحوق عبر الفتحة السفلية (3.2 mm). ويعدُّ هذا الاختبار وسيلة مقارنة وتحليل لأن الأمر لا يتطلب صناعياً مرور المساحيق عبر فتحة صغيرة خلال عمليات الكبس.

د- قابلية الانضغاط (Compressibility).

هي تغير الحجم في واحدة الضغط، أي قابلية المسحوق للانضغاط أو التكثيف نتيجة تطبيق ضغط خارجي. تُوصَّف قابلية الانضغاط بواسطة رسم منحني تغير الكثافة الرطبة (الخضراء) بدلالة الضغط.

يتأثر انضغاط المسحوق بعدة عوامل مثل قساوته الذاتية وشكل حبيباته ومساميتها والتوزع الحبيبي والإضافات المساعدة (مواد مزلقة ومواد رابطة).

وتعرف الانضغاطية كذلك بواسطة معامل التكثيف الذي يحسب بالعلاقة التالية [1]:

$$\text{Densification Factor} = \frac{\text{Green density} - \text{Apparent density}}{\text{Theoretical density} - \text{Apparent density}}$$

(معامل التكثيف)

حيث Green density: الكثافة الرطبة (الخضراء) للمسحوق،

Apparent density : الكثافة الظاهرية للمسحوق،

Theoretical density: الكثافة النظرية للمسحوق.

تتزايد الانضغاطية بشكل عام مع زيادة الكثافة الظاهرية، حيث ينتج تكثيف هام بواسطة ضغطٍ منخفضٍ. وهناك مصطلح آخر مفيد عند تصميم قوالب الكبس والأدوات وهو نسبة الكبس التي تساوي نسبة حجم المسحوق المعد للكبس إلى حجم المضغوطة الناتجة.

ويُفضل غالباً نسبة كبس منخفضة للأسباب التالية:

- امكانية تصغير حجم حجرات التشكيل ضمن القوالب وبالتالي حجوم القوالب والأدوات،
- تقليل اهتلاك وانهيار الأدوات المستخدمة خلال الكبس،
- تخفيض شوط حركة المكبس،
- زيادة الانتاجية بسبب زيادة سرعة امتلاء القالب.

ذ- المقاومة الميكانيكية للمضغوطات الرطبة (الخضراء) (Green Strength):

وهي المقاومة الميكانيكية لمضغوطات المساحيق بعد الكبس وقبل التلبيد، وتعدُّ خاصة هامة جداً لأنها تحدد قدرة المضغوطات الرطبة (الخضراء) على المحافظة على شكلها وأبعادها خلال التناول والمعالجات قبل التلبيد. وتزداد المقاومة الرطبة (الخضراء) في الحالات التالية:

- بزيادة خشونة سطح الحبيبات مما يتيح مواقع تداخل أكثر،
- زيادة مساحة سطح المسحوق، ويتحقق ذلك عن طريق زيادة عدم الانتظام وتقليل أبعاد الحبيبات،
- انخفاض الكثافة الظاهرية للمسحوق نتيجة الحالتين السابقتين،
- انخفاض مستوى الأكسدة السطحية للحبيبات وتلوثها،
- زيادة الكثافة الرطبة (الخضراء).

تحسب المقاومة الميكانيكية الرطبة الخضراء بإجراء اختبار الانعطاف على العينة قبل التلبيد

وتطبيق معادلة اختبار الانعطاف [1]:

$$\text{Green Strength} = 3PL/2Wt^2 \quad \text{(MPa)}$$

حيث:

Green Strength المقاومة الميكانيكية الرطبة (الخضراء) وتقدر بالميغا باسكال (MPa)،

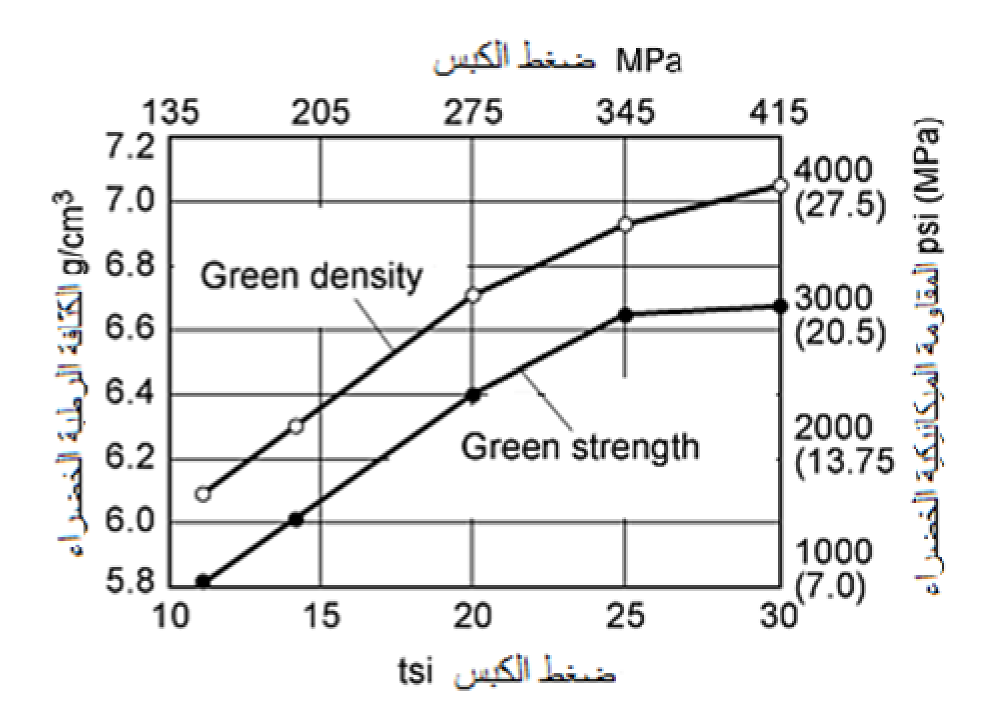
P : القوة العظمى اللازمة لكسر العينة مقدرة بالنيوتن (N)،

L : البعد بين المسندين ويقدر بالـ مم (mm)،

W : عرض العينة ويقدر بالـ مم (mm)،

t : سماكة العينة وتقدر بالـ مم (mm).

يظهر الشكل (١١) تغير المقاومة الميكانيكية الرطبة (الخضراء) والكثافة الرطبة (الخضراء) للمضغوطات بدلالة ضغط الكبس.



الشكل (١١)- تغير المقاومة الميكانيكية الرطبة (الخضراء) والكثافة الرطبة (الخضراء) تبعاً لضغط الكبس [5].

١-١١ معالجات مساحيق المعادن.

١-١١- ١ المعالجة الحرارية (Annealing).

غالباً ما يتم تسليم مساحيق المعادن إلى معامل التصنيع جاهزة للمزج وعمليات التشكيل، إلا أن عمليات الشحن والتخزين لفترات طويلة تسبب تغيراً في بعض مواصفات المسحوق نتيجة التلوث، كما أن ضرورة متطلبات عمليات الكبس والتشكيل تستدعي إجراء عمليات معالجة حرارية مسبقة تهدف إلى تخفيض قساوة المسحوق وزيادة لدونته، والحد من الكميات المتبقية فيه من الأكسجين والكربون والآزوت.

وتجري عملية المعالجة في الفرن ضمن جو خامل أو تحت الخلاء ، كما تتم المعالجة في درجات حرارة منخفضة لتحاشي تلبيد المسحوق.

١-١١- ٢ المزج (Mixing).

هو خلط مكونات المسحوق مع بعضها البعض من أجل الوصول إلى تجانس توزيع المكونات من حيث الشكل والحجم والنوع وتهدف هذه العملية إلى:

- خلط المسحوق المكون من مواد مختلفة،
- تحقيق توزع منتظم للأبعاد المختلفة من الحبيبات،
- إكساء حبيبات المسحوق بالمواد والاضافات اللازمة لعملية الكبس (مواد مزيتة- مواد رابطة).

وتستخدم أنواع متعددة من الخلاطات لإجراء عملية المزج وخلط المساحيق، بحيث تتوافر فيها الشروط التالية:

- تحقيق عملية المزج دون تشوه الحبيبات،
- إنجاز الخلط المطلوب في أقل زمن ممكن،
- تحقيق التجانس التام في توزع المكونات المختلفة في المسحوق،
- تحقيق التكرارية في عملية المزج،
- تأمين التفريغ الكامل للشحنة،
- سهولة التنظيف،
- استهلاك طاقة منخفض،
- سهولة الصيانة،
- تواجد مصيدة للغبار.

أهم العوامل المؤثرة في عملية المزج : نوع الخلاط ؛ حجم الخلاط ؛ هندسة الخلاط ؛ نسبة حجم المسحوق إلى حجم الخلاط ؛ خصائص مكونات المسحوق ؛ سرعة دوران الخلاط ؛ درجة حرارة الخلط وغيرها.

أنواع الخلاطات:

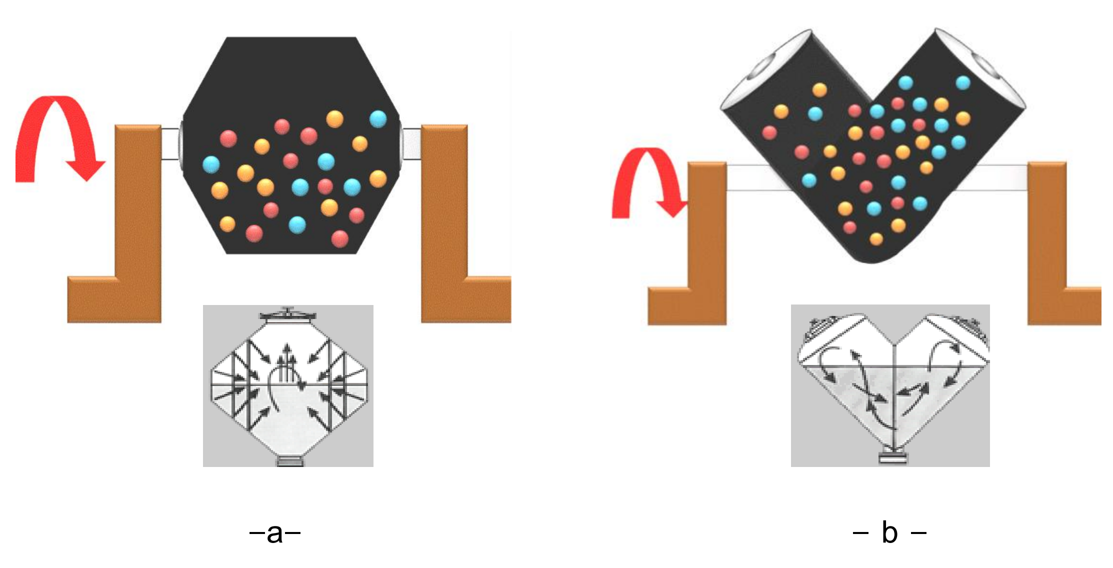
يوجد نوعان للخلاطات الشائعة الاستخدام هي:

- **الخلاط ذو المخروط المزدوج Double Cone Mixer.**

ويتكون من اسطوانة بنهايات مخروطية الشكل تدور حول محور أفقي، يولد الدوران حركة نشر وطي للمسحوق نحو داخل المنطقة المخروطية وخارجها. تعدُّ هذه الطريقة جيدة مع وجود تغير طفيف في شكل حبيبات المسحوق المنفصلة وحجمها. يظهر الشكل (a – 12) نموذجاً من هذا النوع .

- **الخلاط ذو الشكل V (V–Mixer) :**

وهو عبارة عن اسطوانتين متساويتين في الطول تم تجميعهما بشكل حرف V. يدار بواسطة محور أفقي، ويعمل هذا الدوران على فصل المسحوق ونشره ثم إعادة جمعه من جديد. يظهر الشكل (b –12) نموذجاً من هذا النوع [4] .



–a– – b –

الشكل (١٢)– نموذجان لنوعين من الخلاطات المستخدمة a – Double Cone Mixer
b – V–Mixer [1]

١-١١-٣ تخفيض حجم الحبيبات (Particle Size Reduction).

تسبب عمليات خفض حجم حبيبات المسحوق زيادة في السطح النوعي لأنها تؤدي إلى تخفيض الحجم الوسطي للحبيبات .

ومن أجل اختيار الآلة المناسبة لتخفيض حجم الحبيبات يجب مراعاة الأمور التالية:

نوع مادة المسحوق ؛ الحجم النهائي المرغوب للحبيبات ؛ قساوة الحبيبات ؛ التنوع.

أكثر طرق تخفيض الحجم شيوعاً هي : السحق (Pulverizing)؛ المطحنة ذات الكرات (Ball Milling) ؛ قرص الطحن (Disc Grinder) ؛ مطاحن الكرات (Attritor Milling) [5].

١-١١-٤ التحبيب (التكتيل) (Granulation).

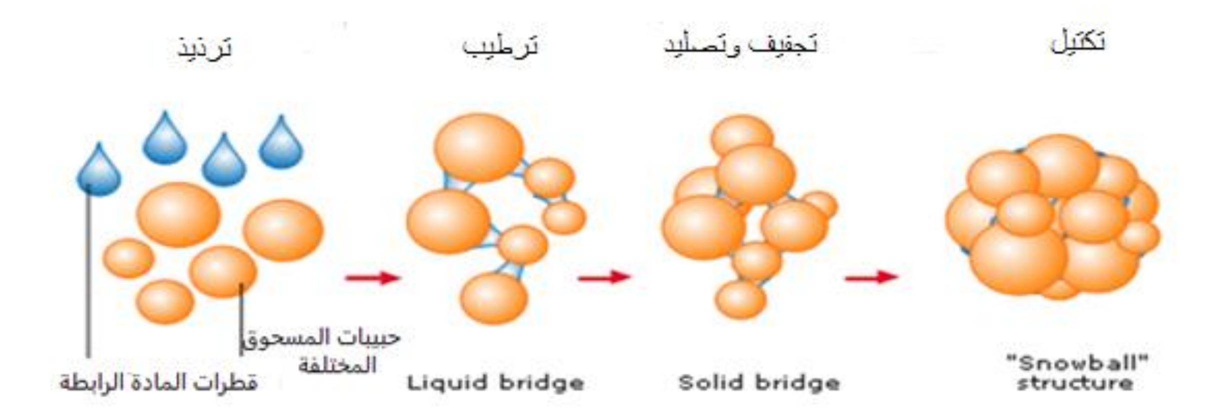
هو تكتيل متعمد للحبيبات صغيرة الحجم على شكل كرات منتظمة أكبر حجماً لتحسين انسيابية المسحوق في مجاري التغذية وفي القوالب. وعند التحبيب، يكتسب المسحوق شكلاً منتظماً وتتحسن كثافته وانسيابيته و قابليته للانضغاط المتجانس.

هناك عدة طرائق للتحبيب منها: التحبيب الجاف، التحبيب بالترذيذ، التحبيب الرطب.

ويستخدم التكتيل الجاف دون محلول سائل عندما يكون المسحوق حساساً للرطوبة والحرارة، ويتم ذلك ميكانيكياً بواسطة إضافة مسحوق مادة رابطة صلبة Binder ثم ضغط المزيج عبر درافيل ضغط للحصول على رقائق.

أما التحبيب الرطب، وهو الأكثر استخداماً، فيتم باستخدام محلول سائل، كحول مثلاً، يحوي مادة رابطة بوليميرية Binder تضاف الى المسحوق لتعمل على ربط الحبيبات المختلفة الحجم والشكل والنوع مع بعضها البعض (حبيبات المسحوق– مواد تزليق) عبر تكوين طبقة رقيقة تكسو الحبيبات، حيث يتم الخلط الرطب جيداً ضمن خلاط خاص مشكلاً كتلة رطبة يتم تجفيفها ثم نخلها لتهيئتها لعملية الكبس. ومن أهم المواد الرابطة الرطبة المستخدمة في التحبيب نذكر: بولي فينيل الكحول (polyvinyl alcohol) والكيروسين (Kerosene) والغليكول (glycol) والغليسيرين (glycerine) والبولي فينيل اسيتات (polyvinyl acetate) وهي المادة التي تم استعمالها في مشروعنا كرابط لربط حبيبات الكربيد والكوبالت [1].

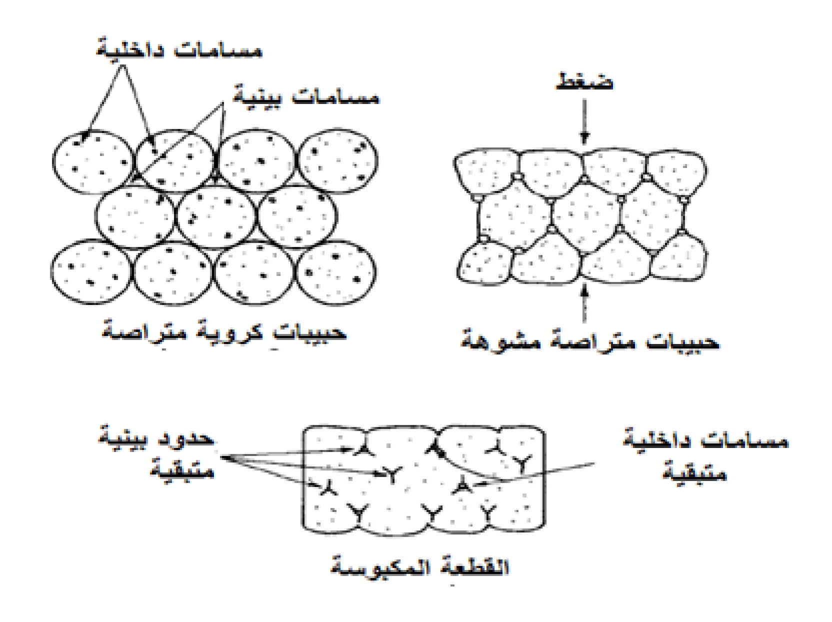
يبين الشكل رقم (١٣) مراحل عملية التحبيب.



الشكل رقم (١٣)- مراحل عملية التحبيب [6].

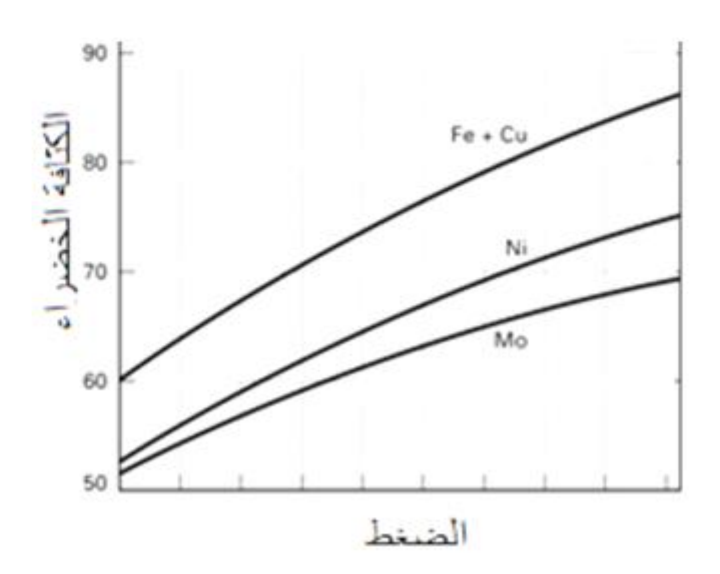
١-١١-٥ الكبس (pressing).

يكمن الهدف الرئيس من كبس المساحيق في تكثيف المسحوق وتشكيله إلى الشكل المرغوب ووفقاً للأبعاد المطلوبة مع مراعاة التغيرات والانكماشات في الأبعاد عند التلبيد والتحكم بمستوى المسامية المطلوبة واعطاء المسحوق المتانة الكافية لإجراء عملية التلبيد اللاحقة.
وتعزى متانة المضغوطة الرطبة (الخضراء) بشكل أساس إلى التشابك والتلاحم الميكانيكي (Inter-Locking) لتضاريس أسطح الحبيبات كما يوضح الشكل (١٤).



الشكل (١٤)- التشابك والتلاحم الميكانيكي بين الحبيبات [5].

تزداد الكثافة الرطبة (الخضراء) بزيادة ضغط الكبس ويوضح الشكل (١٥) هذه الزيادة لبعض المعادن .



الشكل (١٥)– تغير الكثافة الرطبة (الخضراء) مع ضغط الكبس لبعض المعادن [7].

١–١١–٥–١ الكبس المحوري في القالب.

يعدُّ الكبس في القوالب الطريقة التقليدية الأكثر استخداماً في تعدين المساحيق، وتشتمل تجهيزاتها على القوالب المعدنية ومكابس هيدروليكية أو ميكانيكية. ويطلق اسم المضغوطات الرطبة (الخضراء) على القطع المنتجة ضمن هذه القوالب. تسمح هذه الطريقة بعد التلبيد بالوصول إلى ما يزيد على 90% من قيم الكثافة النظرية بعد تطبيق دورة الضغط التي تعدُّ ذات انتاجية عالية ولا تستغرق دورتها أكثر من بضع ثوان للقطع صغيرة الحجم.

لا يشبه سلوك المساحيق عند ضغطها في القالب سلوك الموائع، فهي لا تستجيب بالطريقة نفسها ولا يمكن افتراض تحقيق الكثافة نفسها في جميع مناطق المضغوطة، وذلك بسبب الاحتكاك بين جدران القالب والمسحوق وبين حبيبات المسحوق نفسها مما يعيق انتقال الضغط إلى باقي الحبيبات الأبعد. وهناك عوامل تساهم في انتظام الضغط، وبالتالي تجانس الكثافة في المضغوطات الرطبة (الخضراء) وتعتمد على ما يلي:

- مواد المساحيق المضغوطة ومواد التزليق،
- نوع آلية الضغط المطبقة،
- نوع الأدوات المستخدمة.

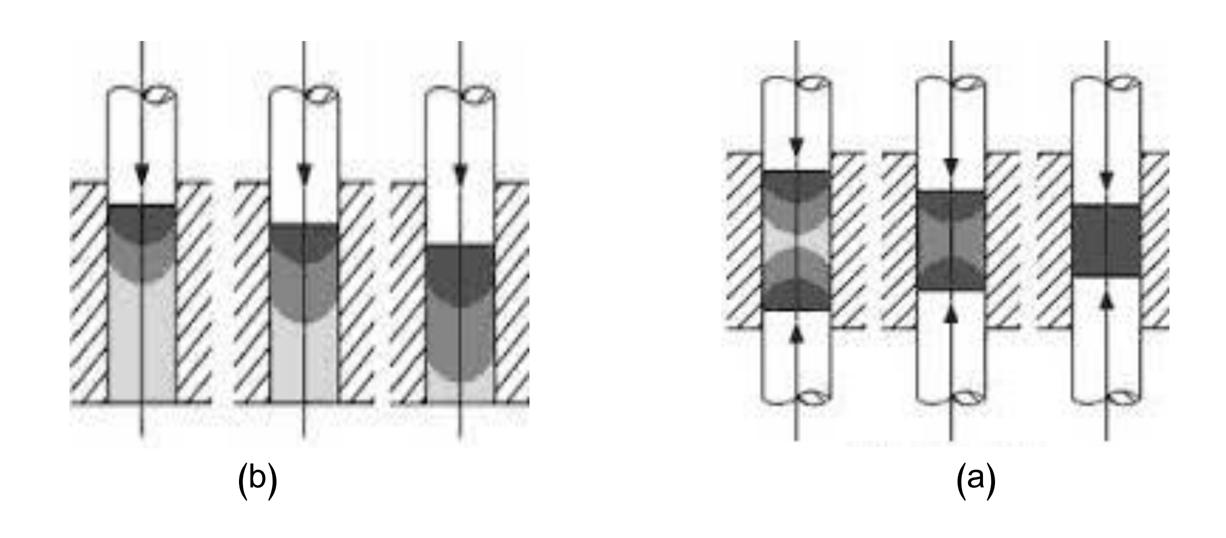
يمكن تصنيف آلية الكبس بواسطة القوالب اعتماداً على الحركة المحورية للمكبس إلى نوعين،

فهناك مكابس أحادية الفعل تدعى (Single action pressing)، حيث يتم تطبيق قوة كبس من جهة وحيدة، والمكابس ثنائية الفعل (Double action pressing) التي تتيح إمكانية تطبيق قوة كبس من جهتين متقابلتين ويكون جسم القالب فيها عائماً. وبناءً عليه، يمكن استخدام قالب مزود بكابس علوي (Upper punch) وكابس سفلي (lower punch) ، حيث يتم كبس القطعة من كلا الطرفين.

في حالة الكبس من جهة وحيدة باستخدام آلية (Upper punch)، يتحرك الكابس محورياً ضمن القالب الثابت نحو الأسفل ضاغطاً المسحوق المملوء مسبقاً في فجوة القالب ويمنع احتكاك المسحوق مع جدران القالب التوزع المنتظم للضغط متسبباً بحدوث كثافة أعلى للقطعة في الجزء المتاخم لسطح الكابس مقارنة مع الطرف البعيد عن الكابس.

أما في حالة الكبس المحوري من الجهتين باستخدام مكابس الفعل المزدوج، يكون جسم القالب عائماً وتستخدم حركة الكابس العلوي والكابس السفلي معاً ليتم ضغط المسحوق من كلا طرفي القطعة، وهذا ما يعطي كثافة متماثلة في الأعلى والأسفل بينما يبقى في المركز منطقة محايدة أقل كثافة نسبياً بحسب طول القطعة ومقدار الضغط المطبق. ومع ذلك، تكون كثافة المضغوطة أكثر تجانساً من طريقة الكبس وحيد الجهة [1].

يوضح الشكل (١٦) كلاً من عمليتي الكبس المذكورتين [8, 4] .



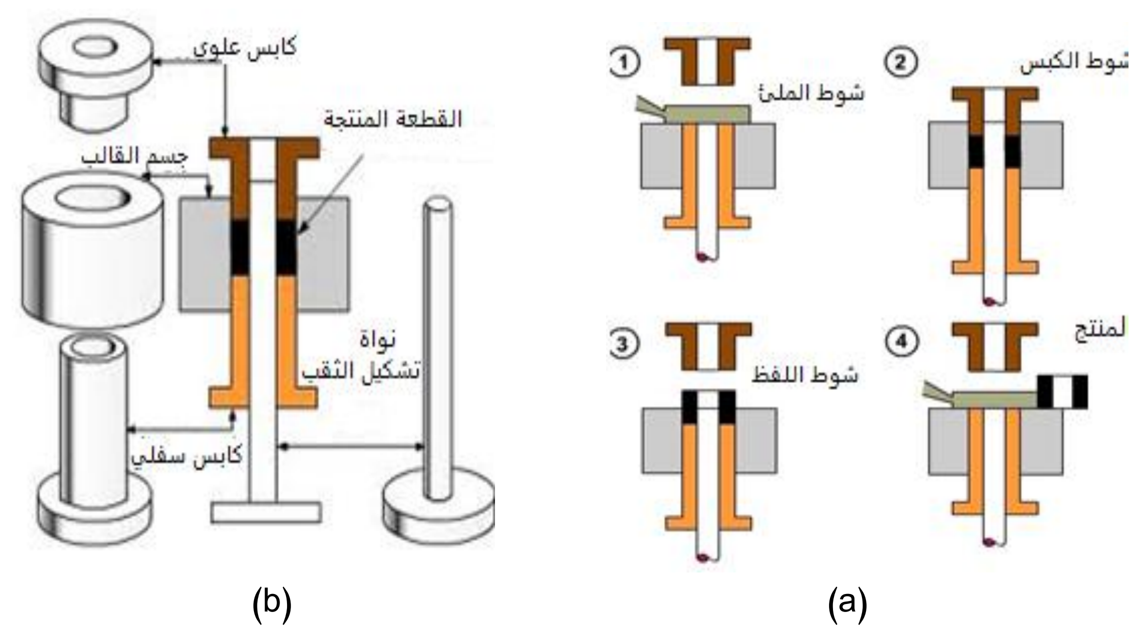
الشكل (١٦)– نوعا طريقة الكبس (a) الكبس ثنائي الفعل (b) الكبس أحادي الفعل [8].

يتضمن تسلسل عمليات الكبس المراحل التالية:

- ملئ تجويف القالب بالمسحوق المعدني،
- شوط الضغط حتى تحقيق الكثافة الرطبة (الخضراء) والسماكة المطلوبة،

- شوط اللفظ وتراجع الكابس نحو خارج القالب،
- لفظ المضغوطة من القالب مع مراعاة عدم تفتتها.

يبين الشكل (١٧) مخططاً توضيحياً لسير مراحل عملية الكبس المحوري في القالب وأجزاء قالب بسيط [4].



الشكل (١٧)– a– مخطط توضيحي لعملية الكبس المحوري لجلبة. b– أجزاء القالب.

المكابس المستخدمة في عملية الكبس.

- تستخدم المكابس الميكانيكية (Mechanical presses) ذات المحرك الكهربائي لضغط المساحيق. يقاد المكبس بواسطة دواليب دورانية تعطي الطاقة الرئيسية المستخدمة في كلا شوطي كبس ولفظ العينات، ويتوضع الدولاب الدوراني على محور ذي سرعة عالية ودوران مستمر ويعطي الطاقة اللازمة بواسطة أحد الميكانيزمات المتعددة التالية (العمود اللامركزي؛ الجذع المعقوف ؛ عمود الكامات وغيرها).
- المكابس الهيدروليكية (Hydraulic Presses): يتم توليد الطاقة اللازمة من خلال تطبيق ضغط السائل على اسطوانة الكبس بواسطة مجموعة ضخ (مضخة + صمامات)، تتميز المكابس الهيدروليكية بالقدرة على تطبيق شوط طويل المسافة وبكامل استطاعة المكبس ولفترة زمنية غير محددة مع تحكم جيد بقوة الضغط المطبق وثباتيتها.

إلا أن هذه المكابس أبطأ من المكابس الميكانيكية وبالتالي فهي أقل إقتصادية وأكثر عرضة للتعطل بسبب تلف المانعات والوصلات الهيدروليكية نتيجة رفع الضغط المفاجئ.

يبين الجدول رقم (٢) مجال الضغوط النموذجية المستخدمة في كبس بعض المساحيق المعدنية والكربيدية بحسب التطبيق [1].

الجدول رقم (٢)– الضغوط النموذجية المستخدمة في كبس بعض المساحيق المعدنية والكربيدية [1].

مادة المسحوق	ضغط الكبس		نسبة الانضغاط
	tsi	N/mm^2	
Aluminium	5–20	70–280	1.5 to 1.9:1
Brass	30–50	415–690	2.4 to 2.6:1
Bronze	15–20	205–230	2.5 to 2.7:1
Copper–graphite brushes	25–30	345–415	2.0 to 3.0:1
Carbides	10–30	140–415	2.0 to 3.0:1
Ferrites	8–12	110–165	3.0:1
Iron bearings	15–25	205–345	2.2:1
Iron parts:			
low density	25–30	345–415	2.0 to 2.4:1
medium density	30–40	415–550	2.1 to 2.5:1
high density	35–60	430–825	2.4 to 2.8:1
Iron powder cores	10–50	140–690	1.5 to 3.5:1
Tungsten	5–10	70–140	2.5:1
Tantalum	5–10	70–140	2.5:1

١–١١–٥–٢ الكبس المتماثل على البارد (Cold Isostatic Pressing CIP).

في هذا الإجراء، يتم تلقيم المسحوق في قالب مطاطي مرن من (Polyurethane) أو غيره له شكل الجزء المراد تشكيله، ومن ثم يجري غمر القالب والمسحوق بداخله في وسط سائل ضغط كالزيت أو الماء ويتم تطبيق ضغط متساوٍ ومتماثل من كافة الاتجاهات على سطوح القالب.
يمكن أن يتراوح الضغط المستخدم بهذه الطريقة ضمن مجال (200–1400 MPa)، ولكن، لا يحتاج الأمر بهذه الطريقة إلى تجاوز ضغط قدره 350 MPa للمضغوطات متوسطة الحجم.

ميزات المضغوطات المصنعة بهذه الطريقة:

- انتظام وتجانس الكثافة في كامل المضغوطة،
- كثافة رطبة (خضراء) أعلى بحدود % 15-5 مقارنة مع طريقة الضغط في القالب،
- مقاومة ميكانيكية رطبة (خضراء) أعلى،
- انخفاض الاجهادات الداخلية للمضغوطات لعدم وجود احتكاك مع جدران القالب (وغياب الشقوق) ،
- إمكانية الكبس دون الحاجة الى مواد تزليق،
- إمكانية كبس قطع ذات أشكال معقدة وكبيرة مع تحقيق تجانس في الكثافة،
- انخفاض التكاليف المتعلقة بالقوالب نظراً لاستعمال قوالب مطاطية أو بلاستيكية.

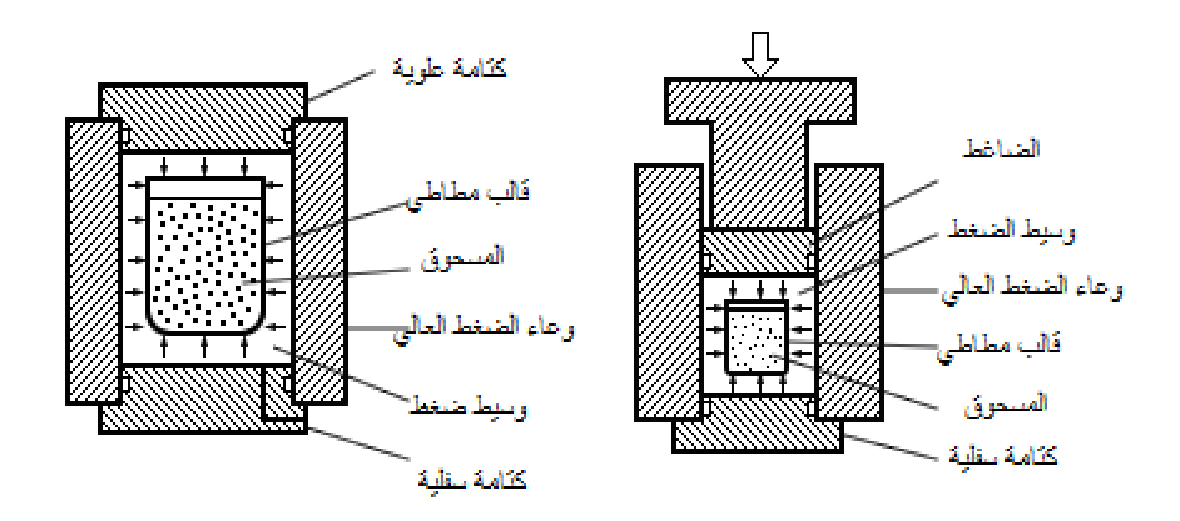
عيوب ومساوئ هذه الطريقة:

- عدم إمكانية ضبط الأبعاد بدقة مقارنة مع القوالب الصلبة،
- خشونة سطوح القطع المنتجة مقارنة مع سطوح القطع المنتجة بواسطة القوالب الصلبة،
- تحتاج أزمنة أطول وبالتالي تكون إنتاجيتها منخفضة،
- القوالب المرنة المستخدمة أقل عمراً من القوالب الصلبة،
- يؤدي حصول تسرب في القالب ضمن حاوية الضغط نتيجة تمزقه أو ضعف الإحكام إلى خسارة المادة عبر تلوثها بسائل الضغط.

تتألف دورة الضغط المتماثل من المراحل التالية:

- إدخال المضغوطة؛ ملئ الكبسولة أو القالب المرن بالمسحوق المعدني ووضعه في الوعاء المعزول بإحكام،
- ملء وتفريغ سائل أو وسيط نقل الضغط،
- تطبيق الضغط المتماثل،
- إزالة الضغط،
- إخراج المضغوطة.

يبين الشكل (١٨) رسماً تخطيطياً لعملية الكبس المتماثل على البارد CIP.



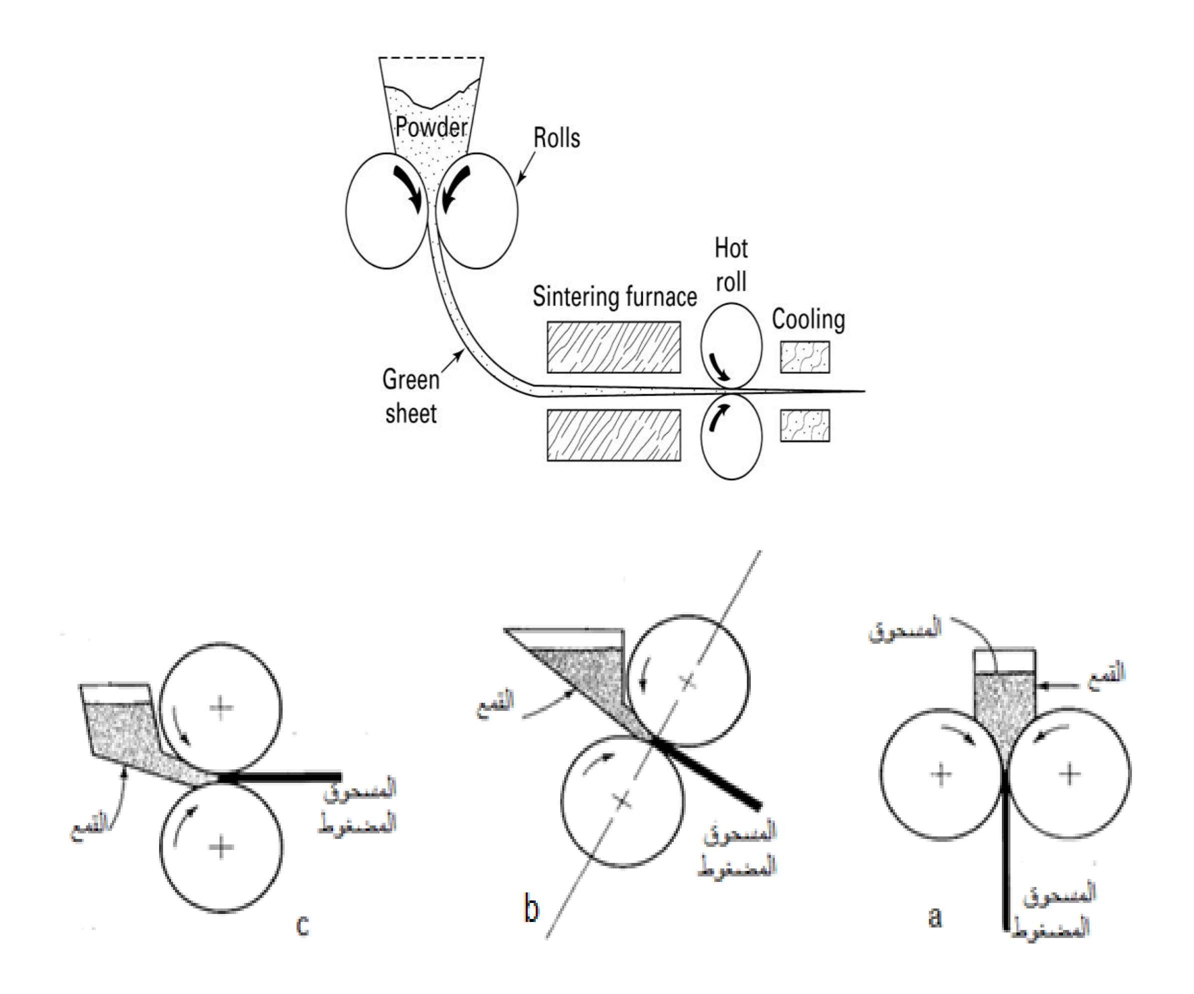
الشكل (١٨)- رسم تخطيطي لعملية الكبس المتماثل على البارد CIP [8 , 3] .

١-١١-٥-٣ الكبس بالدرفلة (Powder Roll Pressing).

تعتبر درفلة المساحيق أحد أساليب إنتاج الرقاقات والصفائح المعدنية حيث يتدفق المسحوق المعدني من قمع التغذية الى فتحة بين درفيلين يدوران باتجاهين متعاكسين ليخرج عبر فتحة الدرافيل (عادة أقل من 5 mm) كرقاقة أو صفيحة رطبة (خضراء) مستمرة كما هو موضح في الشكل (١٩). ويمكن توضع الدرافيل أفقياً أو شاقولياً أو بشكلٍ مائل [5] .

وتؤثر خواص المسحوق المعدني إلى حد كبير على درفلة المساحيق المعدنية من خلال:

١- شكل الحبيبات: ويفضل الشكل غير المنتظم.
٢- القابلية للانضغاط: يجب أن تحقق % 85 -80 من الكثافة النظرية.
٣- حجم الحبيبات: تلعب دوراً كبيراً في تحديد سماكة الرقاقة المنتجة.
٤- الانسيابية: يجب أن ينساب المسحوق برفق وسرعة عبر القمع.
٥- أكسدة السطح: تلعب دوراً كبيراً في تحديد سلوك المادة.



الشكل (١٩)– درفلة المساحيق وأنماط توضع الدرافيل: a أفقي، b مائل، c شاقولي [1,5].

تقسم عملية الدرفلة الى ثلاث مناطق:

١– المنطقة الحرة: يتدفق فيها المسحوق بشكل حر في القمع.
٢– منطقة التغذية: يدخل فيها المسحوق منطقة الدرافيل دون الوصول إلى مرحلة الالتحام.
٣– منطقة الكبس (pressing zone): التحام المسحوق المعدني وتزايد سريع في الكثافة.

١–١٢ التلبيد (Sintering).

تُعد عملية التلبيد من أهم عمليات تعدين المساحيق وذلك لتأثيرها المباشر في خواص القطعة المنتجة ومواصفاتها كافة. ويرجع ذلك إلى ما تحدثه من تغيرات في بنية المسحوق. فبعد الانتهاء من التكتيل والتشكيل بالكبس، تكون القطعة هشة غير صالحة للاستخدام وتتفتت عند تعرضها لأي إجهاد خارجي، لذلك تُعَرّض لعملية التلبيد لإكسابها المتانة الكافية والخواص الفيزيائية

والكيميائية اللازمة للاستخدام. والتلبيد هو الآلية التي يتم بواسطتها ربط حبيبات المسحوق للمضغوطات الرطبة (الخضراء) وتماسكها مع بعضها البعض دون صهرها حيث تتشكل روابط عبر الحدود المتداخلة للحبيبات وتتوسع مناطق التلامس وتنمو بفعل الانتشار الذري (Atomic Diffusion) حيث تتراص الحبيبات ويصغر حجم المسامات بينها ويحدث التكثيف. تجري العملية ضمن أفران وجو تحت التحكم عند درجة حرارة أدنى من درجة حرارة انصهار أحد مكونات المسحوق الأساسية على الأقل. وبما أن عملية التلبيد تجري عادة في درجات حرارة تتجاوز درجات حرارة إعادة تبلور المساحيق المعدنية وتصل أحياناً إلى 0.9 من درجة الانصهار لمعدن المسحوق، يمكن أن يؤدي ذلك إلى حدوث إعادة التبلور مع نمو ملحوظ في الحجم الحبيبي و تغير المسامية للقطعة. يتم أيضاً التخلص من الإجهادات الناجمة عن عملية التشكيل.

١-١٢-١ مراحل عملية التلبيد.

يمكن تقسيم عملية التلبيد إلى المراحل التالية:

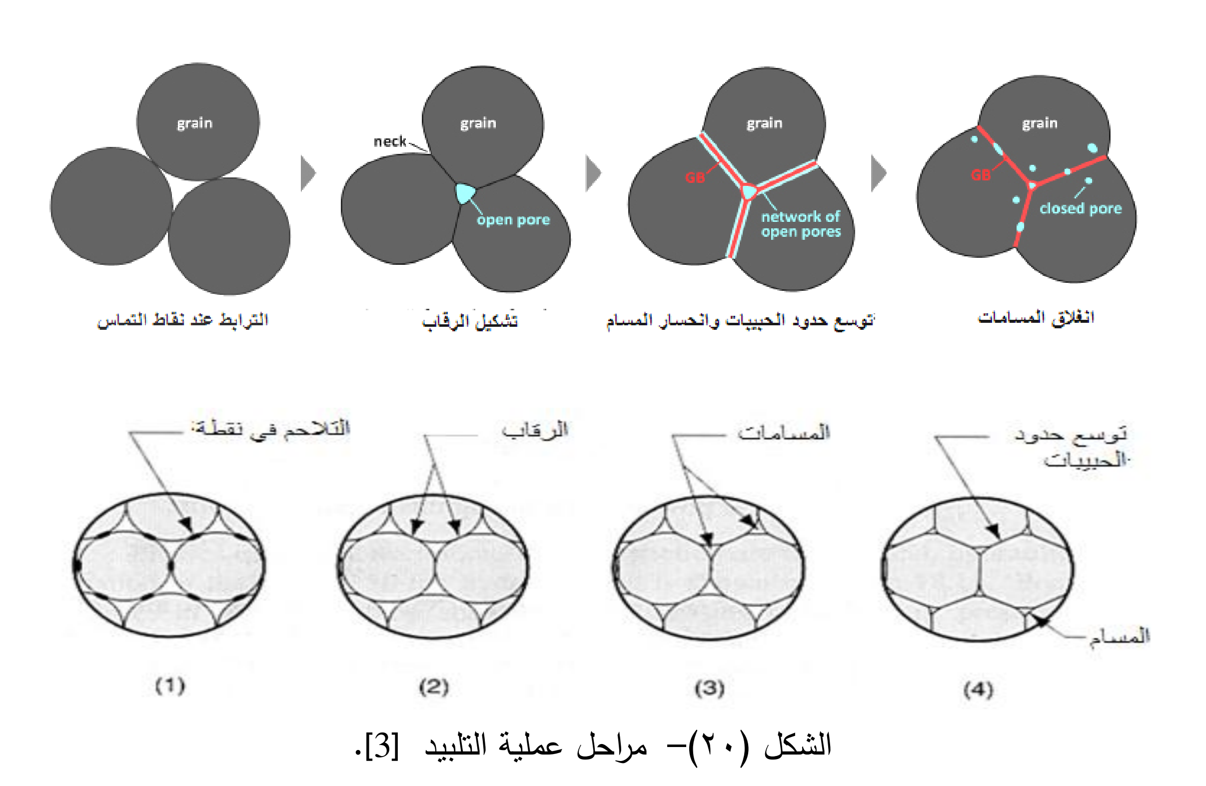
المرحلة (١): التلاحم الموضعي بين الحبيبات عند نقاط التماس.

المرحلة (٢) : تشكل الرقاب حيث تتحول نقاط التماس في نقطة الى تماس على شكل رقبة.

المرحلة (٣) : انخفاض حجوم المسامات بين الحبيبات.

المرحلة (٤) : توسع حدود الحبيبات عند مناطق الرقبة وانغلاق المسامات.

يوضح الشكل (٢٠) مراحل عملية التلبيد.



الشكل (٢٠)– مراحل عملية التلبيد [3].

١-١٢-٢ التلبيد في الطور السائل (Liquid Phase Sintering).

يتم التلبيد في المساحيق، المكونة من أكثر من مكوّن، عند درجة حرارة انصهار أحد مكونات المسحوق ذي درجة الانصهار الأدنى كما في حالة خليطة النحاس والحديد أو خليطة الكربيد والكوبالت حيث يتواجد الطور السائل في بعض مراحل عملية التلبيد. ويمكن أن يكون الطور السائل الناتج قابلاً للاندماج في بعض المكونات الصلبة على شكل محاليل صلبة، أو إذابة بعضها في محلول سائل يتبلور فيما بعد إلى محلول صلب أو إلى عدة أطوار صلبة. ويؤدي وجود الطور السائل إلى إزالة المسامية كلياً أو جزئياً. وهكذا، قد تتغير كلياً البنية الصلبة للمزيج، وتتغير تبعاً لذلك الخواص كافة. ويتم الحصول على البنية المطلوبة والخواص اللازمة عن طريق التحكم في العوامل الرئيسية المؤثرة في عملية التلبيد وهي درجة حرارة وزمن التلبيد وجو الفرن. وتتميز هذه الطريقة بكونها تعطي كثافة عالية.

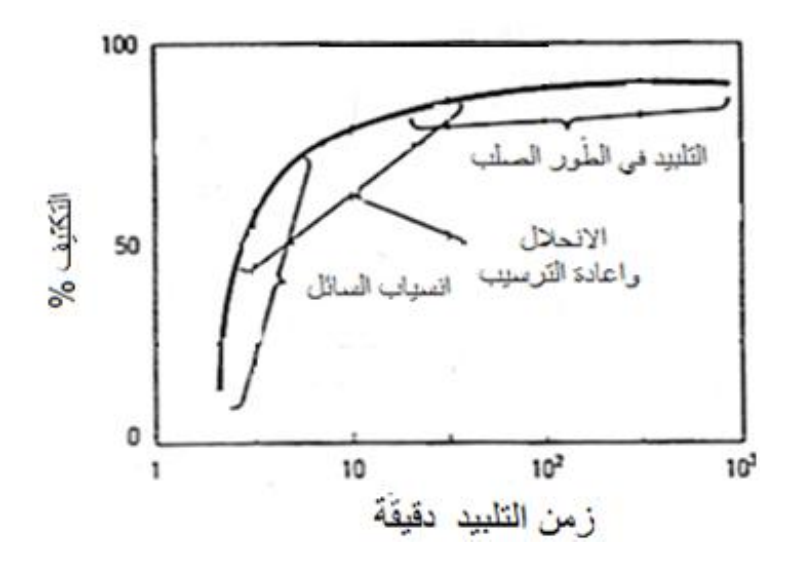
وهناك نمطان لهذه العملية:

- الطريقة الاعتيادية للتلبيد في الطور السائل، ويتعلق تشكل الطور السائل بانصهار أحد المساحيق الداخلة في تركيب المضغوطة الخضراء.
- طريقة إشباع المضغوطة الخضراء بسائل معدن مصهور تم تحضيره بشكل منفصل، حيث يتم ملء المسامات بمعدن الاشباع السائل، حيث تكون درجة حرارة انصهاره أقل من درجة حرارة انصهار المضغوطة.

تمر عملية التلبيد في الطور السائل بثلاث مراحل:

- انصهار السائل وانسيابه عبر المسامات بواسطة الخاصة الشعرية وقوى التوتر السطحي وإعادة توضع الحبيبات،
- انحلال الحبيبات وإعادة الترسيب عند الفجوات وحدوث التكثيف،
- التلبيد والتكثيف في الطور الصلب مع انتقال السائل من مناطق الرصّ نحو المسامات.

يبين الشكل (٢١) مراحل عملية التلبيد في الطور السائل بدلالة نسبة التكثيف وزمن التلبيد [5].



الشكل (٢١)- مراحل عملية التلبيد في الطور السائل بدلالة نسبة التكثيف وزمن التلبيد [1, 5]

١-١٢-٣ التلبيد المنشَّط (Activated Sintering).

يتم فيه تخفيض طاقة التنشيط اللازمة لحدوث التلبيد بواسطة إضافات كيميائية إلى تركيب خليطة المسحوق أو استخدام جو غازي معين ومن أجل معادن محددة. ومن أهم الإضافات المعدنية نذكر النيكل والبالاديوم.

١-١٢-٤ التلبيد الجزئي (Loose Sintering).

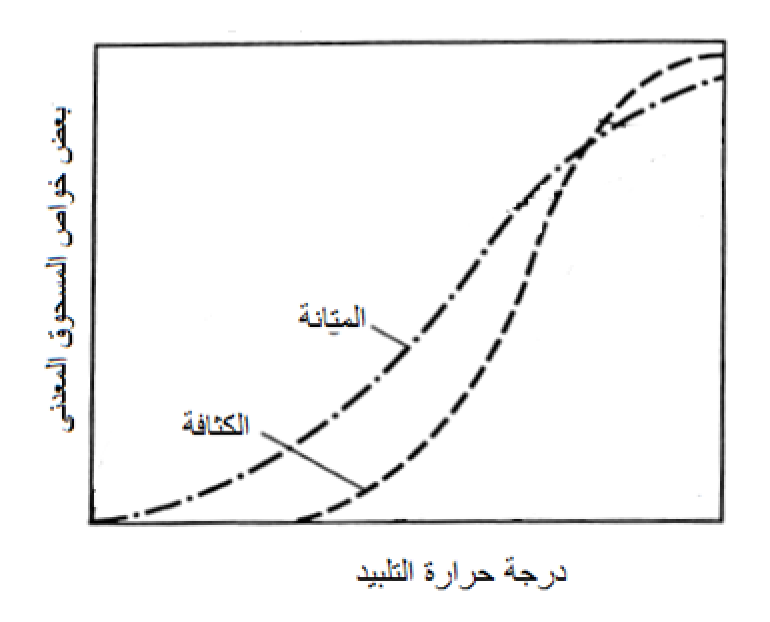
وتستخدم هذه الطريقة لتصنيع القطع ذات المسامية العالية مثل المرشحات (الفلاتر) حيث يتم صب مسحوق المعدن وهزه في القالب الذي يتم تسخينه إلى درجة حرارة التلبيد ضمن جو محدد من الغاز.

١-١٢-٥ متغيرات عملية التلبيد.

إن أهم المعاملات والمتحولات خلال عملية التلبيد هي:

أ- **درجة حرارة التلبيد:** تلعب درجة حرارة التلبيد دوراً هاماً في تغيير مواصفات القطع الملبدة وخواصها، مثل خواص الكثافة والمقاومة الميكانيكية، فتزداد عموماً الكثافة والمتانة بشكل كبير مع زيادة درجة حرارة التلبيد وعادة ما تتراوح هذه الدرجة بين 0.9 -0.7 من درجة حرارة انصهار المسحوق المعدني قيد التلبيد.

يوضح الشكل (٢٢) تأثير درجة حرارة التلبيد في بعض خواص قطع المسحوق المعدني الملبدة [5].



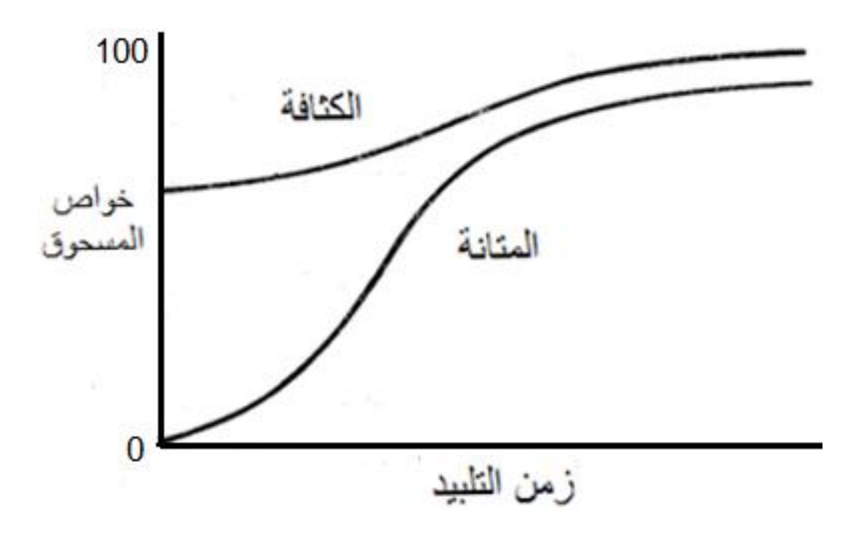
الشكل (٢٢)– تأثير درجة حرارة التلبيد في بعض خواص قطع المسحوق المعدني الملبدة [5].

ب– **زمن التلبيد:** تزداد بعض خواص المسحوق المعدني بزيادة زمن التلبيد إلا أن ذلك التأثير صغير بالمقارنة مع تأثير درجة حرارة التلبيد، حيث أنه من الصعب إزالة جميع المسامات عن طريق زيادة زمن التلبيد بمفرده.

ويتراوح زمن التلبيد عادة للمساحيق المعدنية من 8 –0.5 ساعات، إلا أن إطالة فترة التلبيد تؤدي إلى ازدياد حجم الحبيبات الملبدة بفعل النمو الناتج عن عمليات الانتشار الحاصلة.

وتتطلب نجاح عملية التلبيد محيطاً مناسباً وجواً مسيطراً عليه لحماية المنتجات طوال فترة التسخين كما هو موضح في الجدول رقم (٣)، وسنأتي على ذكر ذلك بالتفصيل لاحقاً.

يوضح الشكل (٢٣) تأثير زمن التلبيد في بعض خواص قطع المسحوق المعدني الملبدة.



الشكل (٢٣)– تأثير زمن التلبيد في بعض خواص قطع المسحوق المعدني الملبدة [1، 5].

يبين الجدول رقم (3) قيم درجات حرارة التلبيد المثلى وزمن التلبيد والجو الأمثل لأهم المساحيق المعدنية حسب American Society of Metals (ASM) [1].

الجدول (٣)– درجة حرارة وزمن التلبيد والجو الأمثل لبعض أهم المساحيق المعدنية [3 , 4].

المسحوق المعدني	درجة حرارة التلبيد (°C)	زمن التلبيد (دقيقة)	الجو الأمثل
Aluminium alloyes	590 – 620	20 – 40	100% N_2
Copper, brass	850 - 910	10 – 40	N_2 / 5-10%H_2
bronze	740 - 800	10 - 20	N_2/ 5-20%H_2 endogas
Iron based	1100 -1150	20 - 30	Endogas/75%H2+25%N2
Nickel	1000 -1100	30 - 40	N_2/ 5-10%H_2 or Vac
Stainless steels	1100 -1290	30 - 60	N_2+H_2 - Vacuum
Ferrites	1100 -1325	10 - 600	Ar or N_2
Tungsten carbide	1430 -1500	30 - 60	100% H_2 or Vacuum
Molybdenum	2050	120	100% H_2
Tungsten	2300	480	100% H_2
Titanium	1000 – 1260	480	Ar / H2 / Vacuum

ج- متغيرات المادة.

- حجم الحبيبات: إن استخدام حبيبات مسحوقية ذات حجوم أصغر ينعكس بشكل إيجابي في تسريع عمليات التلبيد وتحسينها بسبب أن نقصان حجم الحبيبة يعني زيادة سطح التماس بين الحبيبات وزيادة معدل الانتشار بينها.
- شكل الحبيبات: يؤدي استخدام حبيبات أقل كروية وأكثر خشونة إلى زيادة مساحة السطح النوعي وزيادة سطوح التماس ما بين الحبيبات وبالتالي تحسن عمليات التلبيد.
- تركيب المسحوق: تؤثر الإضافات الخلائطية والشوائب في المسحوق على سير عملية التلبيد ويمكن أن تكون مفيدة أو ضارة أحياناً بحسب توزعها وفعلها، حيث يعدُّ تلوث سطح الحبيبة بفعل الأكسدة غير مرغوب به دائماً.
- المقاومة الميكانيكية الرطبة (الخضراء): إن ارتفاع الكثافة الرطبة (الخضراء) للمضغوطات قبل التلبيد تزيد من كثافة وخواص المساحيق بعد تلبيدها.

د - تغيرات الأبعاد والشكل.

تعدُّ تغيرات الأبعاد المرافقة لعمليات التلبيد ذات أهمية بالغة ولا سيما عندما تكون تسامحات الأبعاد المطلوبة صغيرة مما يتطلب عمليات إنهاء للقطع الملبدة. ويجب إدخال مقدار الإنكماش النهائي في الاعتبارات التصميمية للقالب للحصول على قطع نهائية أو شبه نهائية.

تترافق عملية التلبيد عموماً مع تناقص في الحجم (عدا بعض حالات خاصة) بسبب تقلص المسامات أو اختفائها.

وتؤثر العوامل التالية في تغيرات أبعاد القطع الملبدة أو شكلها:

- الغازات المحتبسة: يمكن للغازات المتبقية في القطع أن تتمدد داخل المسامات المغلقة مسببة تمدد المضغوطة،
- التفاعلات الكيميائية: يسبب تواجد بعض الغازات ضمن جو التلبيد، وهو أمر شائع، احتمال انتشارها في القطعة وتشكيل مسامات معزولة، فيمكن لغاز الهيدروجين أن يتحد مع الأوكسجين المتواجد ضمن جو التلبيد ليشكل بخار الماء الذي يؤدي ضغطه إلى تمدد القطعة بأكملها،
- الخلائط المعدنية: عند استخدام خليط مسحوق مكون من عنصرين معدنيين أو أكثر يمكن أن يتشكل خلال التلبيد طور محلول صلب مما يؤدي إلى تغيرات أبعاد مرافقة لهذه الأطوار.

وقد يحدث تغيرات بعدية غير منتظمة نتيجة اختلاف معدل الانتشار بين المعدنين الداخلين في تركيب الخليطة الثنائية.

- اختلافات الكثافة: يحدث تغير كبير غير منتظم في الشكل (تشوه) نظراً لأن الأجزاء ذات الكثافة الرطبة (الخضراء) المنخفضة ستتقلص بشكل أكبر خلال عملية التلبيد.

هـ- التغيرات في البنية المجهرية.

من الصعب معاينة حدود الحبيبات الأصلية للعينات الملبدة، وتصبح حدود الحبيبات أقل وضوحاً منها في البنية المجهرية للمعادن المعروفة مع احتوائها على المسامات بنوعيها المفتوحة والمغلقة. ومع استمرار عملية التلبيد، تبدأ المسامات بالتقلص حتى تصل نسبة المسامية إلى حوالي % 5 حيث يبدأ تشكل المسامات المغلقة.

أثناء التلبيد في الطور السائل، تتناقص المسامية بينما يزداد حجم الحبيبات ويتغير شكلها بسرعة وتكون المسامات غير منتظمة في المرحلة الأولى ثم تأخذ شكل شبكة اسطوانية وأخيراً الشكل الكروي.

١-١٢-٦ أجواء التلبيد (Sintering Atmospheres).

يتوجب عند إجراء عملية التلبيد السيطرة والتحكم بالأجواء المحيطة بالقطع خلال مراحل التسخين المختلفة بهدف حماية المساحيق المعدنية والكربيدية من الأكسدة والتفاعلات غير المرغوبة، فلا يمكن إجراء التلبيد في الهواء أو في جو غني بالأوكسجين ولا بد من تأمين جو خاص يناسب المسحوق قيد التلبيد، وأهم الأجواء المستخدمة في التلبيد نذكر [4]:

أ-جو غاز الهيدروجين (H_2):

يعدُّ غاز الهيدروجين أكثر الغازات استخداماً في تلبيد مساحيق المعادن وخاصة الكربيدية منها، ولكنه غير اقتصادي ومرتفع الخطورة (متفجر) ومنخفض الوزن النوعي($0.069\ g/cm^3$) وأخف من الهواء بكثير وتبلغ ناقليته الحرارية سبعة أضعاف مثيلتها في الهواء. لذلك، يُسرِّع الهيدروجين معدلات التسخين والتبريد في الأفران.

تكمن خاصية الهيدروجين بأنه غاز مرجع شره للأوكسجين ومستقر حتى 1500 °C وتكون حالة سطوح القطع المعدنية الملبدة في جو منه ناصعة وترتبط تطبيقاته النموذجية في خفض أكسدة الحديد والموليبدينيوم والتنغستن والكوبالت والتيتانيوم وكربيداتها [1].

ب- جو غاز الآزوت (N_2).

يعدُّ غاز الآزوت غازاً خاملاً غير قابل للاشتعال، آمن وشائع الاستخدام واقتصادي. يستحصل عليه من عملية فصل الهواء لمكوناته الأساسية حيث تبلغ حصته فيه 78% وذلك عن طريق التسييل أو باستعمال المنخل الجزيئي. يعدُّ الآزوت رخيص الثمن وفعال في كسح جو الفرن من الهواء وتفريغه من الغازات الأخرى ويبقى خاملاً ومستقراً حتى 1000 °C تقريباً. غير أنه، عند درجات حرارة أعلى، يتفكك الى صيغته الذرية (N) النشطة كيميائياً ويصبح غازاً منترِداً. لهذا، لا يستخدم لعمليات التلبيد عند درجات الحرارة العالية، وإنما عموماً في تلبيد الحديد والفولاذ الكربوني والخلائط الحديدية واللاحديدية [1].

ج- جو الأمونيا المحطَّمة.

طريقة واسعة الانتشار واقتصادية وذات أثر فعال في التلبيد نتيجة محتواها العالي من الهيدروجين وكونها لا تحوي مركبات مثل CO و CO_2 والماء ومركبات الأوكسجين والكبريت الأخرى.
يتشكل هذا الجو عن طريق تحطيم مركب غاز النشادر في فرن مقاومة كهربائي بوجود سطح محفز (حديد + نيكل) وذلك عند درجة حرارة 1000 °C وفق المعادلة التالية:

$$2NH_3 \longrightarrow N_2 + 3H_2$$

يعطي هذا التفاعل تركيباً مؤلفاً من 75% حجماً H_2 و 25% حجماً N_2 ، وبعد التبريد يدخل الغاز مباشرة إلى فرن التلبيد. وتستخدم هذه الطريقة لتلبيد مساحيق خلائط النحاس والحديد والتنغستن والألمنيوم والفولاذ المقاوم للصدأ بأنواعه [1].

د- جو الآرغون والهليوم.

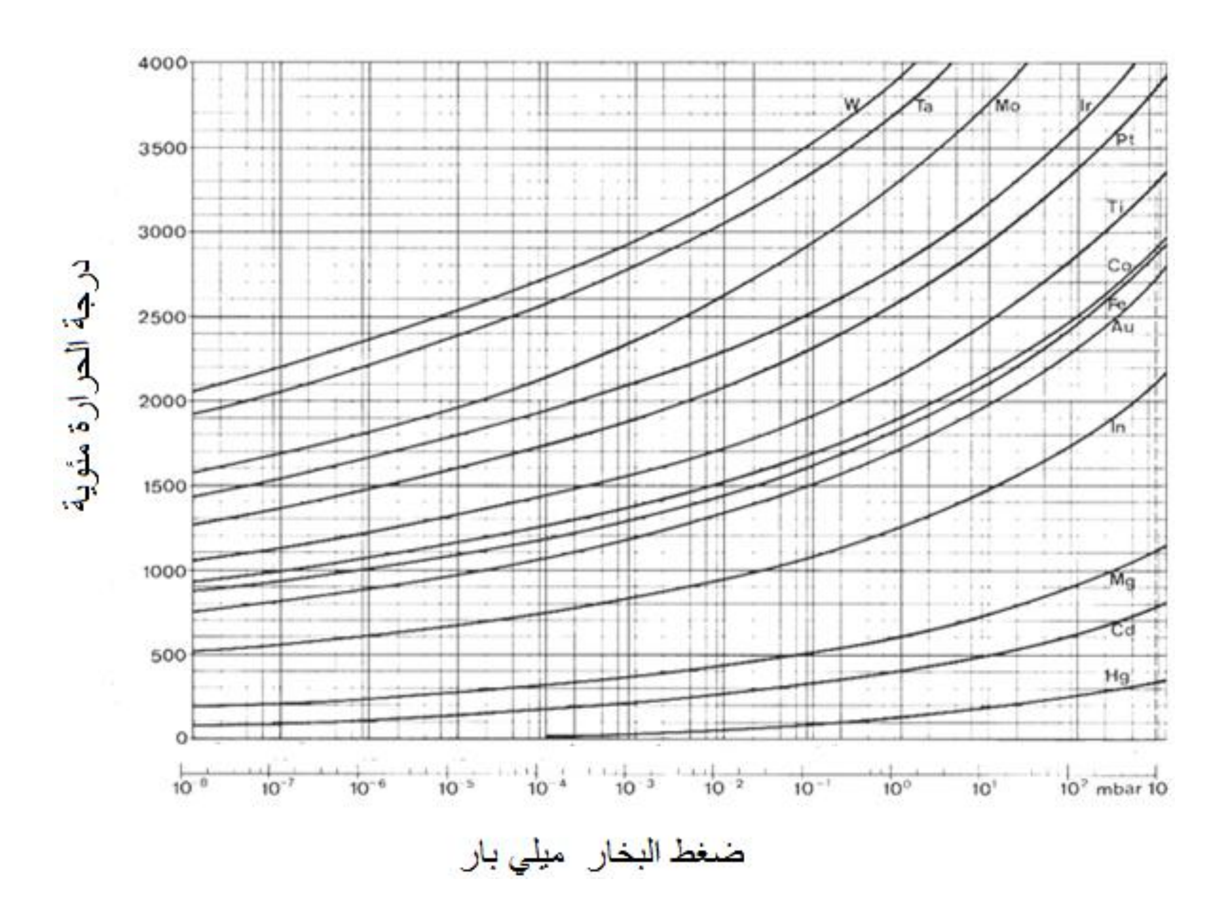
يعدُّ غاز الآرغون وغاز الهليوم غازين خاملين وغير قابلين للاشتعال وكلاهما يمكن استخدمه في جميع التطبيقات ولا سيما مع المعادن ذات درجة حرارة الانصهار العالية والمعادن النشطة كيميائياً. ويحد من استعمال غاز الآرغون كلفة انتاجه المرتفعة من الهواء حيث يُنتج بنقاوة عالية جداً.

هـ- جو التخلية.

التخلية هي تفريغ الجو المحيط (داخل الفرن) من الهواء إلى أقل درجة ممكنة تناسب تلبيد نوعية المركبات المزمعة. يستخدم هذا النوع من الأفران لتلبيد فولاذ العدة والفولاذ المقاوم للصدأ والكربيدات والمعادن المقاومة للحرارة والمركبات النشطة التي يمكن أن تتفاعل مع جو الهيدروجين أو الآزوت أو أول أكسيد الكربون. يعدُّ الخلاء أكثر اقتصادية من حيث استهلاك الغازات إلا أن كلفة تجهيزاتها عالية وتستهلك كمية كبيرة من الطاقة الكهربائية والزيت اللازم لعمل مضخات التخلية.

ويجب الانتباه عند التلبيد في درجات الحرارة العالية ألا يصل ضغط التفريغ في أفران التخلية إلى قيم متدنية تتجاوز ضغط تبخر أحد مكونات الخليطة المزمع تلبيدها كي لا يحدث ضياع واستنزاف جزءٍ منها.

يوضح الشكل (٢٤) ضغط البخار لبعض المعادن المعروفة عند درجات حرارة مختلفة [4].



الشكل (٢٤) – ضغط البخار لبعض المعادن المعروفة تبعاً لدرجة الحرارة [4].

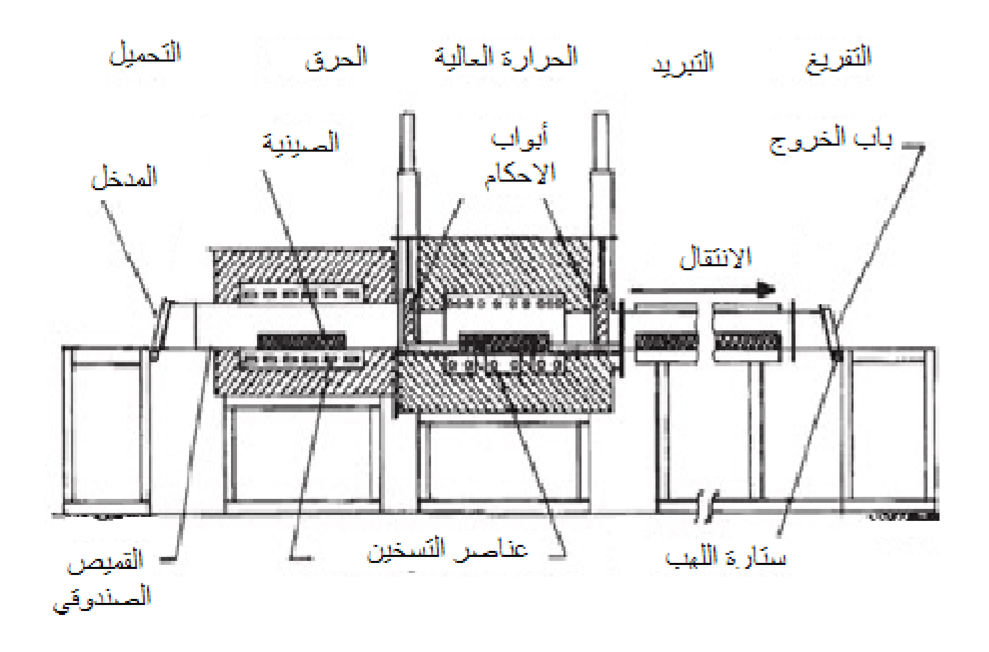
١-١٢- ٧ أفران التلبيد.

تتشابه أفران التلبيد مع أفران المعالجة الحرارية ذات الأجواء الواقية (protective gas Furnace) ويكمن الفارق الرئيس في اختيار جو التلبيد بعناية حسب نوعية مكونات المسحوق الملبّد. ويعود ذلك إلى كون مضغوطات المساحيق المعدنية مسامية بشكل عام مما يجعل مساحة سطوح حبيباتها المعرضة لجو الفرن، من جهة، أكبر من مساحة سطوح منتجات المعادن الصلبة المسكوبة ودرجة حرارة تلبيدها أكبر من درجة حرارة المعالجة الحرارية من جهة أخرى. لهذا، فهي تكون عرضة للتأثر إلى حد بعيد بالجو المحيط.

يمكن تصنيف أفران التلبيد إلى الأنواع الثلاث التالية:

١ - الأفران محدودة الانتاج (Batch-Type Furnace).

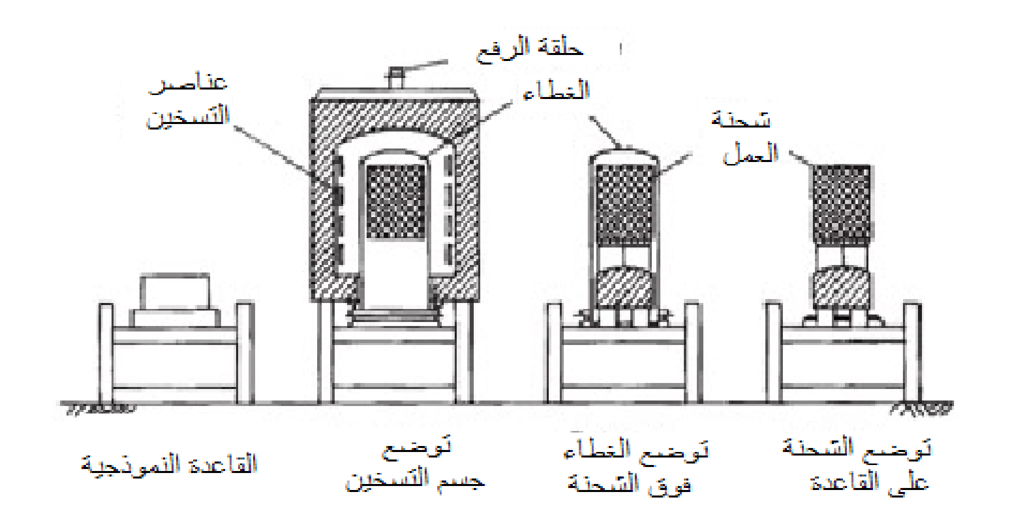
تَستخدم هذه الأفران في حجرة التلبيد أجواء واقية من الغاز حيث تُجمَع دفعة المنتجات المراد تلبيدها وتُشحن معاً إلى داخل حجرة التسخين في الفرن ذي التشغيل اليدوي. وتلائم هذه الأفران المنتجات محدودة الكمية. يبين الشكل (٢٥) نموذجاً تخطيطياً لهذا النوع من الأفران [1].



الشكل (٢٥)- فرن التلبيد محدود الإنتاج (اليدوي) [4].

وهناك نوع شائع آخر ينتمي لهذا النمط يعرف بالفرن الجرسي (Bell Furnace)، قاعدته مثبتة على الأرض وتوضع عليها القطع المراد تلبيدها ثم تغطى الشحنة بشكل محكم وكتيم بقميص معدني لحقن الغاز الواقي، ثم يوضع جسم الفرن مع عناصر التسخين على القاعدة.

يوضح الشكل (٢٦) مراحل عمل هذا الفرن.



الشكل (٢٦) مراحل عمل الفرن الجرسي (Bell Furnace) [1].

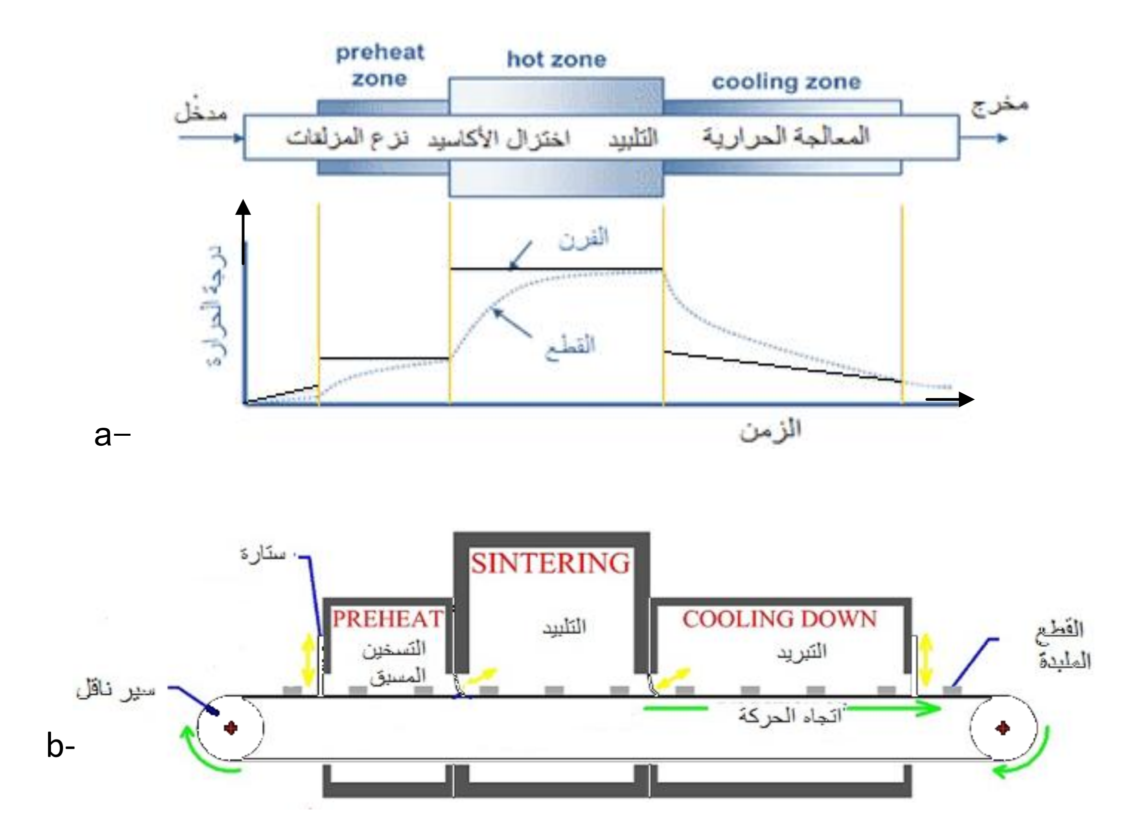
٢ – أفران التلبيد المستمرة (Continuous Sintering Furnace).

تستخدم هذه الأفران لعمليات الإنتاج الكمي التي لا تلبيها أفران الدفعات المحدودة. تكون حركة المضغوطات مستمرة وفق عدة طرائق مختلفة.

يقسّم العمل في الفرن إلى عدة مناطق هي:

- منطقة التسخين الأولي (Preheat Area) حيث تحرق وتزال كل من الإضافات والرطوبة (مواد التزليق والمواد الرابطة)،
- منطقة التسخين العالي أو التلبيد (High-Heat Area) حيث تجري عمليات الانتشار والتكثيف،
- منطقة التبريد (Cooling Area) لحماية المنتجات من الصدمة الحرارية والتأكسد.

يوضح الشكل (٢٧) الدورة الحرارية النموذجية للتلبيد ومراحل العمل في فرن التلبيد المستمر. [1 ، 4].

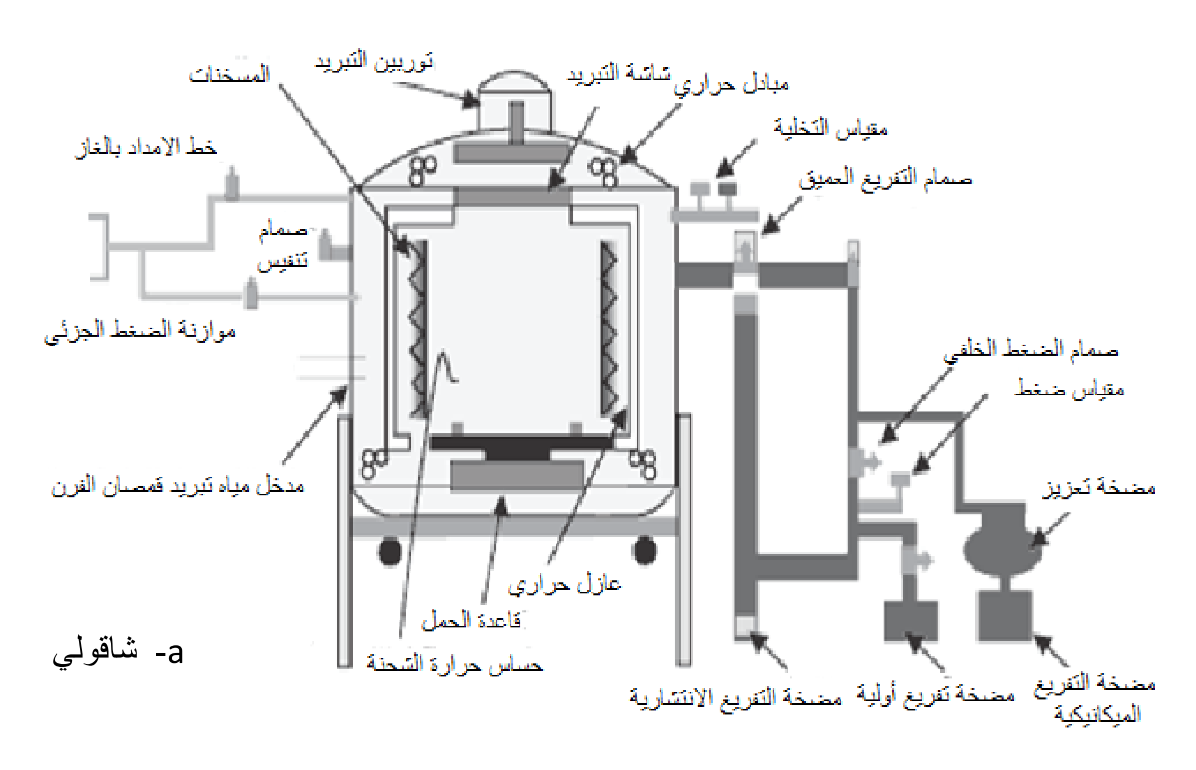


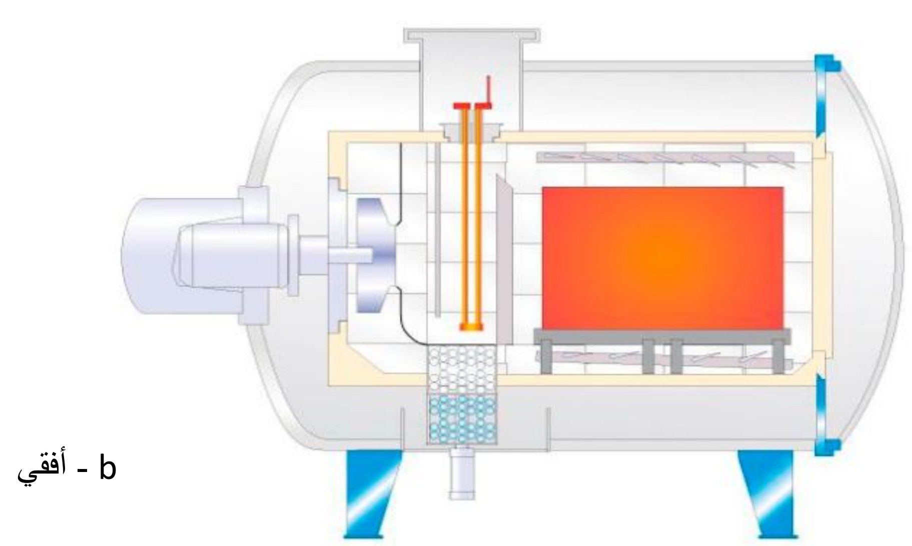
الشكل(٢٧)- a- دورة حرارية نموذجية للتلبيد b- مراحل العمل في الأفران المستمرة [1،3].

٣- أفران التخلية (Vacuum Furnace).

تعد أفران التخلية عموماً من زمرة الأفران محدودة الانتاج Batch-Type Furnace. ومع تطور صناعة هذه الأفران، أصبحت كبيرة الحجم وذات إنتاجية عالية. وتختلف أفران التخلية عن النوعين الآخرين بأن التلبيد يتم بمعزل عن الهواء والغازات الأخرى وهذا يمنع حدوث الأكسدة ويحمي المنتجات من التلوث أثناء التلبيد. وتدعى عمليات المعالجة الحرارية التي تتم في هذه الأفران بالمعالجة البرَّاقة (Bright Sintering) نظراً لكون سطوح المنتجات المعالجة بهذه الطريقة نظيفة وعالية المواصفات [9].

يبين الشكل (٢٨) فرن التخلية النموذجي للتلبيد Vacuum furnace for sintering بنوعيه الشاقولي والأفقي مع أجزائه [1].





الشكل (٢٨)– فرن التلبيد بالتخلية 1700 °C: a– شاقولي b– أفقي [1، 9] .

عناصر التسخين الكهربائية المستخدمة في الأفران.

أهم عناصر التسخين الكهربائية المستخدمة في أفران التلبيد هي:

- عناصر التسخين اللامعدنية مثل ديسيليسيد الموليبدينيوم $MoSi_2$ ، كربيد السيليكون SiC ، الغرافيت ، الألياف الكربونية المركبة CFC (Composite Fiber Carbon)،

- خلائط نيكل – كروم (Base-metal nickel-chromium alloys)،
- عناصر التسخين المصنوعة من المعادن المقاومة للحرارة مثل الموليبدينيوم والتنغستن (Refractory metal heating elements).

تستخدم عناصر التسخين المصنوعة من الغرافيت والكربون والمعادن المقاومة للحرارة عموماً ضمن أفران التخلية، وقد يسبب الاختيار الخاطئ لنوعية عنصر التسخين في حال عدم التوافق مع جو الفرن الذي يعمل فيه أضراراً كبيرة وتلفاً للعنصر [9].

يبين الجدول رقم (٤) درجات الحرارة العظمى والجو المناسب لكل نوع من هذه العناصر.

الجدول رقم (٤) – عناصر التسخين المستخدمة في الأفران واستخداماتها [1].

عنصر التسخين	درجة الحرارة العظمى (°C)	الجو المحيط
Nichrome (Ni–Cr)	1150	١,٢,٣,٤,٥,٦
Kanthal (Fe–cr–al)	1300	١,٣,٤,٦
Super Kanthal ($Mosi_2$)	1800	١,٣
Silicon carbide Sic	1250 1600	١,٢,٣,٤,٥,٦ ١,٣
Platinum	1500	١,٣,٤
Molybdenum	1800 2200	٢,٣,٤,٥,٦ ٤
Tantalum	1900 2400	٣,٤ ٤
Tungsten	1900 2600	٢,٣,٤ ٤
Graphite	2000 3000	٣,٤,٥ ٣,٤
١ مؤكسد ٢ مرجع ٣ خامل ٤ خلاء ٥ مكربن ٦ غير مكربن		

١-١٢-٨ مناطق التلبيد (Sintering Zones).

نميز في افران التلبيد التقليدية المراحل الثلاثة التالية:

أ- **مرحلة الاحتراق** (Burn–off): ويتم فيها تسخين المضغوطات الرطبة (الخضراء) بسرعة تسخين بطيئة إلى درجة بحدود 450 °C بهدف التخلص من المزلقات التي تمت إضافتها وتجنب الضغط الزائد الذي قد يؤدي إلى التشقق والتكسر ضمن المضغوطة. يجب أن تكون المدة الزمنية لهذه المرحلة كافية للتخلص من المزلقات قبل دخول المضغوطة إلى مرحلة التسخين عند درجات الحرارة العالية [1].

يعطي الجدول رقم (٥) أكثر أنواع المزلقات استخداماً في كبس المضغوطات وصيغتها الكيميائية ودرجة انصهارها [4].

الجدول رقم (٥)- أهم أنواع المزلقات المستخدمة في كبس المضغوطات [4].

المزلق	الصيغة الكيميائية	درجة الانصهار	
		ºC	ºF
Zinc Stearate	$Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$	130	266
Lithium Stearate	$LiC_{18}H_{35}O_2$	221	430
Paraffin	$C_{22}H_{46}$ to $C_{25}H_{52}$	40 – 60	104 – 140

ب- **مرحلة التسخين الرئيسة عند درجات الحرارة العالية** (High Temperature Zone):
يتم في هذه المرحلة حدوث التلبيد الحقيقي للمضغوطة حيث يتم غالباً التحام الحبيبات المنفصلة معاً وازدياد الكثافة بسبب انكماش المضغوطة. ولا يستغرق بقاء المنتجات عادة فترة طويلة ضمن هذه المرحلة.

ج- **مرحلة التبريد** (Cooling Zone): يتم تبريد المضغوطات بسرعة بطيئة نسبياً لتجنب الصدمة الحرارية للمضغوطات وتشوهها، ويتم التبريد داخل الفرن حتى درجة حرارة منخفضة لتجنب أكسدة المادة عند تعرضها للجو المحيط لحظة خروجها. يكون التبريد عند درجات الحرارة المنخفضة بطيء نسبياً ويمكن تسريعه عبر دارات التبريد الهوائية أو المائية في الفرن [1].

١-١٢-٩ التلبيد في مسحوق خامل.

يمكن إجراء عملية تلبيد المضغوطات في درجات الحرارة العالية بواسطة التسخين غير المباشر ضمن حاوية محكمة الاغلاق توضع فيها القطع وتغمر بمسحوق خامل يرك جيداً حولها. عندئذ، لاحاجة إلى حماية القطع من الجو الخارجي حيث أن الهواء المتبقي بين حبيبات المسحوق الخامل لايسبب تأكسداً شديداً في المضغوطات قيد التلبيد. وغالباً ما تكون الحاوية من الغرافيت والمسحوق الخامل من المغنيزيا (MgO) [9].

١- ١٣ التكثيف الساخن [Hot Densification].

يتم تطبيق طرائق التكثيف الساخن للحصول على أعلى كثافة ممكنة للمسحوق مع بنية تسمح بالحصول على خواص ميكانيكية عالية، ومن أهم هذه الطرائق نذكر:

١- ١٣-١ الكبس الساخن (Hot Pressing).

تستخدم هذه الطريقة مع المساحيق ذات الانضغاطية الضعيفة وصعبة التلبيد. تجمع هذه الطرائق بين عمليتي الكبس والتلبيد في آن واحد أي تطبيق الضغط ودرجة الحرارة في الوقت نفسه. وتسمح هذه الطريقة بالحصول على قيم قريبة من الكثافة النظرية في كثير من المواد ولاسيما المواد القاسية. ويعود ذلك إلى أن مقاومة حبيبات المعدن للتشوه اللدن تتناقص بسرعة مع زيادة درجة الحرارة، وبالتالي لا داعي لاستخدام ضغوط عالية في طريقة الكبس الساخن.

يعدُّ التكثيف الساخن أقل حساسية لخواص المسحوق التي تلعب دوراً مؤثراً في عملية الكبس البارد مثل شكل الحبيبات وحجمها وتوزعها الحجمي [1].

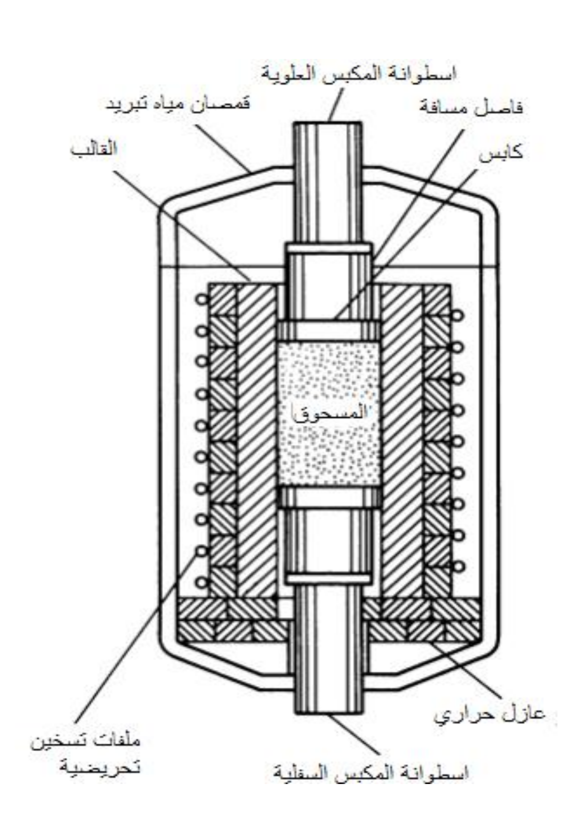
أما متغيرات الكبس الساخن التي تحدد خواص المضغوطة فهي الزمن ودرجة الحرارة و الضغط وجو العمل.

إن أكثر التطبيقات ملاءمة للكبس الساخن هي فولاذ HSS – السبائك الفائقة Super alloys – البيريليوم – المعادن المقاومة للحرارة Refractory Metals.

الخطوات الأساسية في عملية الكبس على الساخن:

- تهيئة قالب الكبس وتعبئة المسحوق المعدني في القالب،
- تسخين مسبق للقالب إلى درجة حرارة محددة،
- تطبيق الضغط على المسحوق الموجود في فجوة القالب،
- زيادة درجة الحرارة أثناء الضغط حتى الوصول إلى الدرجة العظمى المطلوبة (بواسطة وشيعة تسخين بالتحريض)،
- تثبيت الحرارة والضغط لزمن محدد،
- تبريد القالب تحت الضغط المطبق لتجنب أكسدة المعدن.

و يوضح الشكل رقم (٢٩) مخطط طريقة الكبس الساخن [1].



الشكل رقم (٢٩) - مخطط طريقة الكبس الساخن [1].

١-١٣-٢ **الكبس المتماثل الساخن** (Hot Isostatic Pressing – HIP).

تتم هذه التقانة عبر استخدام غاز يتم ضغطه لدرجة عالية وتطبيق هذا الضغط بشكل متساوي على المضغوطة مع رفع درجة الحرارة بآن واحد. يتم إنجاز هذه العملية في أوعية خاصة كتيمة

ومحكمة الإغلاق تتحمل الضغوط ودرجات الحرارة العالية ولا تتفاعل مع المساحيق المستخدمة. ويمكن بهذه الطريقة الحصول على مضغوطات خالية من المسامات وذات كثافة متجانسة تقارب % 100 من الكثافة النظرية.

يتراوح مجال درجات الحرارة المستخدمة في تقانة HIP بين 480 °C لمساحيق خلائط الألمنيوم وحتى 1700 °C لمساحيق التنغستن والموليبدينيوم، ويستخدم عادة غاز الآرغون وأحياناً الآزوت والهليوم. وتتراوح قيم الضغط المطبق عادة بين 20 حتى 300 ميغاباسكال.

أما التجهيزات المستخدمة في الكبس المتماثل الساخن، فهي:

١- وعاء الضغط أو الحاوية،

٢- الفرن،

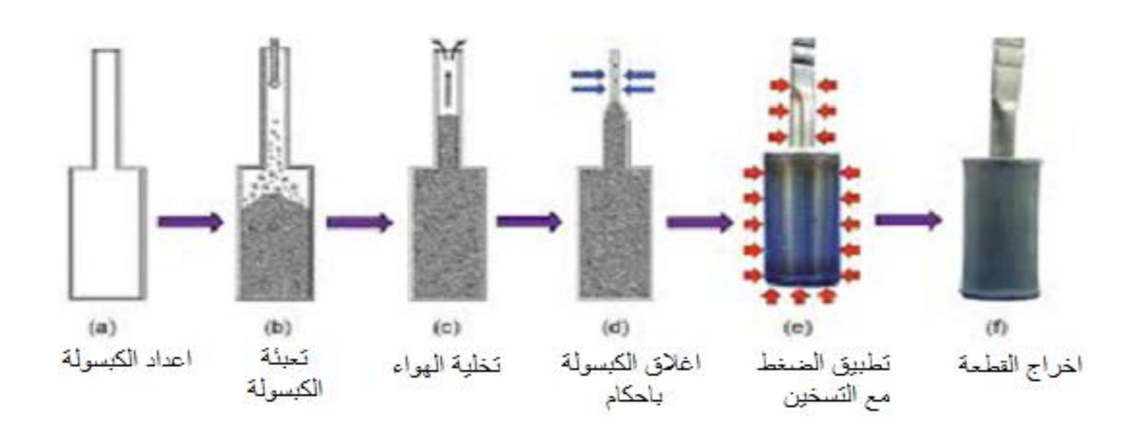
٣- وحدة غاز المعالجة،

٤- وحدة التحكم PLC القابلة للبرمجة،

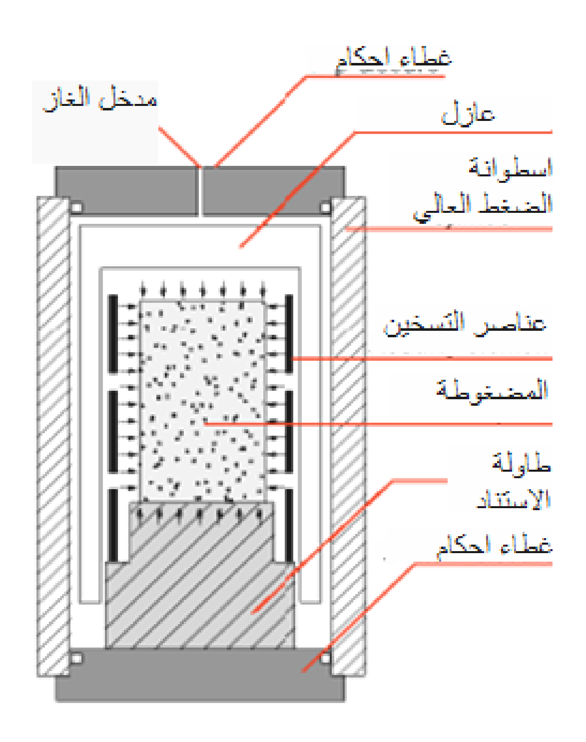
٥- الأنظمة المساعدة (نظام التبريد- نظام التخلية- نظام تعزيز الضغط -كبسولات ومثبتات القطعة وغيرها).

يوضح الشكل رقم (٣٠- أ) مراحل تسلسل خطوات هذه العملية.

بينما يظهر الشكل رقم (٣٠- ب) وحدة الكبس المتماثل الساخن HIP [1, 9].



الشكل رقم (٣٠- أ) - تسلسل خطوات عملية الكبس المتماثل الساخن HIP.
[www.iwm.rwth-aachen.de/index.php?id=549]



الشكل رقم (٣٠- ب)- وحدة الكبس المتماثل الساخن HIP [9].

١-١٣-٣ تطريق المساحيق (Powder Forging).

حتى مع استخدام قيم ضغط عالية، تكون القطع الملبدة والمنتجة بالطرائق التقليدية مسامية مما يضعف خواصها الميكانيكية. يمكن التخلص من المسامية عن طريق إجراء عملية تطريق ليتم الوصول إلى كثافة كاملة تقريباً وذلك بتطبيق قوى ديناميكية تحت تأثير إجهادات القص والتسخين. وتفيد هذه الطريقة أيضاً في تحسين خواص المقاومة الميكانيكية.

وهناك نوعان لطريقة التطريق:

- التطريق التقليدي للمساحيق (Conventional powder forging)،
- تطريق المساحيق مسبقة التشكيل (Preform powder forging).

– **التطريق التقليدي للمساحيق** (Conventional powder forging).

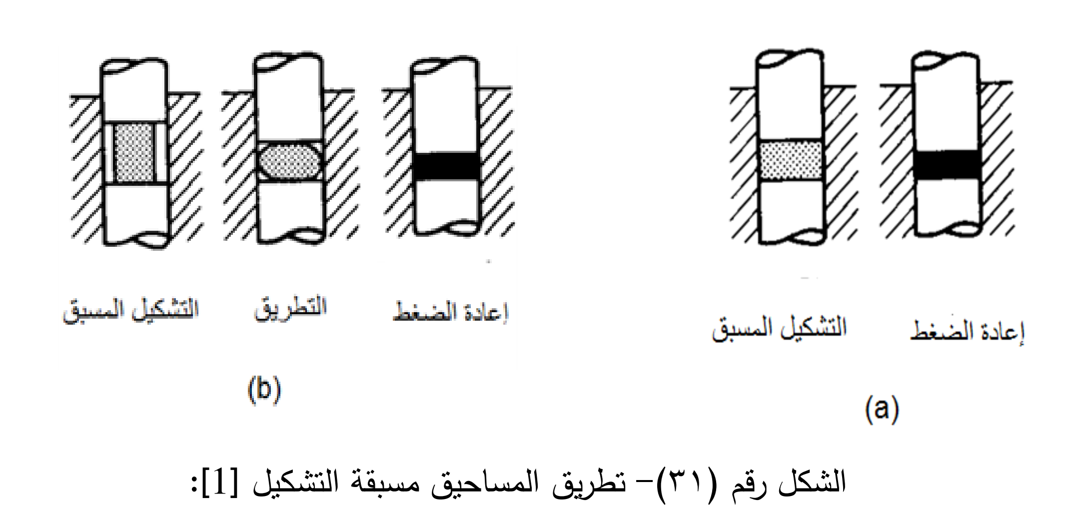
تتم عملية التطريق على المضغوطة الأصلية للمسحوق الحر حيث يُعلَّب المسحوق في وعاء محكم يتم تخليته وضغطه بواسطة مكبس التطريق التقليدي بسرعة عالية. وبعد ذلك، يتم إخراج القطعة ذات الكثافة العالية جداً التي قد لا تحتاج إلى عملية تلبيد لاحقة.

- **تطريق المساحيق مسبقة التشكيل** (Preform powder forging).

تشتمل على عمليتين هما تشكيل المساحيق وتطريقها وذلك عبر مرحلتين أساسيتين:

١- ضغط المسحوق مسبق التشكيل في قالب مشابه للمقطع النهائي وهو ما يعرف بإعادة الضغط على الساخن (Hot repressing) حيث يتم التكثيف بواسطة انسياب جانبي محدود أو بدونه- الشكل (31-a)،

٢- ضغط المسحوق مسبق التشكيل في قالب مختلف الشكل وهذا ما يشابه التطريق الحقيقي حيث يتم إنجاز التكثيف وتغيير الشكل في الوقت نفسه من خلال تشوه لدن وانسياب جانبي كبيرين- الشكل (31-b) [5].



الشكل رقم (٣١)- تطريق المساحيق مسبقة التشكيل [1]:
a) مخطط الطريقة ١ b) مخطط الطريقة ٢.

١-١٤ حقن المساحيق (Powder Injection Moulding) – PIM.

في البداية، استخدمت طريقة الحقن في القوالب للمواد البلاستيكية، ومع تطور التقانات أصبح بالإمكان استخدامها للمساحيق المعدنية (Metal Injection Moulding MIM) والسيراميكية (Ceramic Injection Moulding CIM) خصوصاً مع توفر المساحيق فائقة النعومة وتطور تجهيزات الحقن. تركزت أهم تطبيقات هذه التقنية في مجال الصناعات الحربية وقطع الحواسب والطابعات والطيران والصناعات الفضائية والطب وطب الأسنان وغيرها.

تُلخص أهم ميزات هذه الطريقة في:

١- إنتاجية عالية مع كلفة منخفضة نسبياً خاصة للقطع الصغيرة وبفضل أتمتتها،

٢- إمكانية إنتاج أكثر من قطعة في قالب واحد متعدد الحجرات،

٣- إمكانية إنتاج أشكال معقدة وقطع ذات جدران رقيقة لا يمكن تصنيعها بطريقة الضغط والتلبيد العادية،

٤- تسمح بتنوع المساحيق المعدنية المستخدمة،

٥- إمكانية الحصول على خواص نهائية عالية وسطوح منتهية عالية الجودة.

يبين الشكل (٣٢) بعض القطع الهندسية المنتجة بطريقة حقن المساحيق المعدنية [10 , 1].



الشكل (٣٢)- بعض القطع الهندسية المنتجة بطريقة حقن المساحيق المعدنية MIM [7] .

وتشتمل هذه الطريقة على خطوات العمل التالية:

أ- إعداد خليطة التغذية اللازمة للحقن وتدعى (Feedstock) حيث تحضر من المسحوق المعدني ورابط بوليميري مع التهيئة والمزج والتحبيب (مسحوق معدني - رابط ومذيب عضوي- مواد مزلقة)،

ب-الحقن في القوالب (Injection moulding) بواسطة آلات الحقن المناسبة لحقن المعادن والمشابهة لأسلوب حقن المواد البلاستيكية،

ت-إزالة المادة الرابطة (Debinding) عبر إجراء كيميائي أو حراري،

ث-التلبيد (Sintering).

يوضح الشكل رقم (٣٣) المخطط التقاني لمراحل عملية حقن المساحيق [5].



الشكل(٣٣)- المخطط التقاني لعملية حقن المساحيق بالقالب (MIM) [10] .

وتتطلب عملية الحقن مسحوقاً ناعم الحبيبات بقطر أقل من ٢٠ ميكرون كما يفضل الشكل الكروي للحبيبة.

يتم في البداية خلط كمية من المسحوق مع نسبة معينة من رابط بوليميري مثل (بولي فينيل الكحول) مع مذيب عضوي وإضافات مواد مزلقة هلامية أو شمعية كشمع البارافين. لتشكيل المادة الخام الجاهزة للحقن وتأمين انسيابيتها في آلة الحقن، يُصار إلى تحبيبها على شكل أقراص صغيرة مشابهة لحبيبات الحقن البلاستيكية. عند التسخين، ينصهر البوليمر وينساب ليحقن في تجويف القالب. بعد ذلك، يتم تبريد القالب لتسهيل لفظ القطعة الرطبة (الخضراء) بشكل متماسك. تُجمع القطع ليتم ازالة المادة الرابطة (Binder) بطرائق كيميائية ضمن محاليل أو حرارية في أفران. تدعى القطع الناتجة، نسبة إلى لونها، بالبنيّة وتكون ذات بنية اسفنجية ويتم تلبيدها في الفرن.

تصل كثافة القطع المصنعة بهذه الطريقة إلى % 98 -95 من الكثافة النظرية [1].

١-١٥ ضبط الجودة لمنتجات مساحيق المعادن.

تشتمل عملية ضبط الجودة والوثوقية لمنتجات المساحيق المعدنية على تحديد مواصفات المنتج الأساسية خلال سلسلة مراحل تصنيع وعمر المنتج أي المراحل التالية:

١- اعتبار متطلبات الجودة منذ مرحلة التصميم،
٢- مرحلة التصنيع،
٣- مرحلة الخدمة والاستثمار.

١-١٥-١ أخذ العينات (Sampling).

عند اختيار عينات الاختبار يجب الحرص على أن تكون مُمَثِلة، لذلك، يجب الانتباه عند اختيار العينات على أن يتوافق المصنّع والمستثمر على النقاط التالية:

١- الخواص التي يجب اختبارها ومقدار قيمها ومجالات تسامحاتها النسبية،
٢- طريقة انتقاء العينات ومعايير القبول والرفض للمنتج،
٣- طرائق القياس التي يجب اتباعها لكل خاصّة يتم اختبارها [1].

١-١٥-٢ الكثافة (Density) والمسامية (Porosity).

تتراوح عادة قيم الكثافة لمنتجات تعدين المساحيق ما بين % 95 -70 من الكثافة النظرية للمنتجات نفسها المصنعة بالطرائق الأخرى، ويعتمد ذلك على طريقة الانتاج المتبعة والتطبيق النهائي.

تقاس الكثافة بواحدة $g.cm^{-3}$ ويتم تعريفها بتقسيم الوزن في الهواء (m) على الحجم (V) وفق المعادلة:

$$\rho = m / V \quad (g/cm^3)$$

أما بالنسبة للخليطة المعدنية المكونة من عدة معادن فيتم حساب قيمة الكثافة النظرية للخليطة من خلال معرفة النسبة الوزنية وكثافة كل عنصر في مزيج المساحيق وفق العلاقة الآتية [1]:

$$\rho_c = \frac{\rho_1 \rho_2}{x_1 \rho_2 + x_2 \rho_1} \times 100\%$$

ρ_C : الكثافة النظرية للمزيج أو الخليطة g/cm^3،

ρ_1 : الكثافة النظرية للعنصر الأول g/cm^3،

ρ_2 : الكثافة النظرية للعنصر الثاني g/cm^3،

X_1 , X_2 : النسبة الوزنية المئوية للعنصر الأول والثاني على التوالي.

فيما يتعلق بالمسامية، تكون المسامات على نوعين هما:

١- المسامات المتصلة: وهي المسامات المفتوحة على بعضها عند منطقة الاتصال بين الحبيبات وتكون غير منتظمة في حال كانت الحبيبات غير منتظمة والعكس صحيح والحد الأدنى لهذه المسامات هو بحدود 5 % من المسامية الكلية.

٢- المسامات المغلقة أو المعزولة: تظهر هذه المسامات عندما تكون المسامية أقل من 5 % وتميل غالباً إلى الشكل الكروي.

يمكن حساب المسامية من العلاقة التالية [1]:

$$P\ \% = [1 - (\rho / \rho_c)] \times 100\ \%$$

حيث :

P :النسبة المئوية للمسامية،

ρ : الكثافة الحقيقية للمنتج بعد التلبيد (g/cm^3)،

ρ_c : الكثافة النظرية للمنتج (g/cm^3).

١-١٥-٣ **الخواص الميكانيكية** (Mechanical Properties).

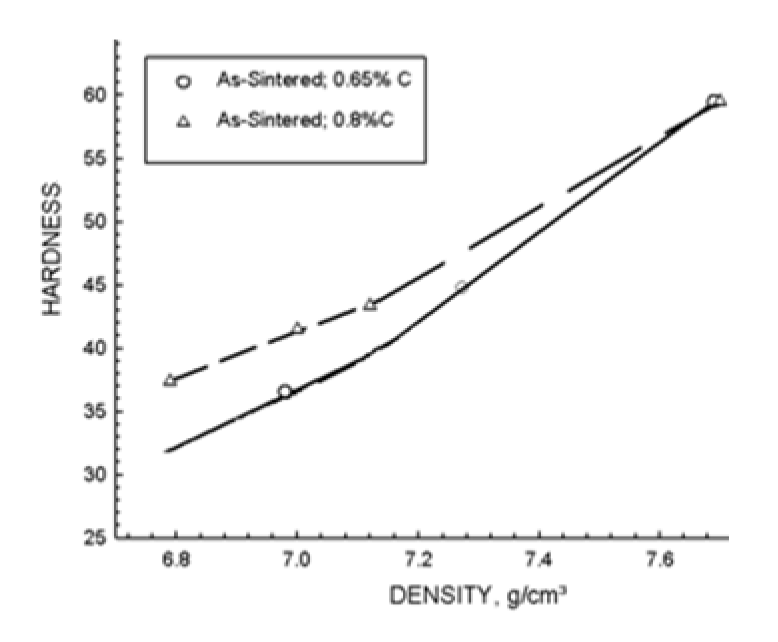
تتأثر الخواص الميكانيكية لمنتجات تعدين المساحيق بكل من التركيب الكيميائي وخواص الحبيبات والكثافة أو المسامية وطريقة التصنيع وأهم هذه الخواص:

١-١٥-٣-١ **القساوة** (Hardness).

تعبر القساوة عن مقاومة الخدش أو الاختراق أو الاهتراء لمادة معينة عند ضغط مادة مرجعية عالية القساوة على سطحها بقوة محددة. وتعدُّ، إضافة للكثافة، خاصة هامة جداً ولا سيما لدى اختبار المواد الكربيدية، كما تعطينا مؤشراً عن السلوك الميكانيكي للمنتجات الملبدة. تتعلق قساوة القطع الملبدة بشكل كبير أيضاً بالكثافة (والمسامية) كما يبين الشكل (٣٤)، حيث تبدي القطع

المسامية اختلافات وعدم تجانس في القساوة بسبب وقوع رأس القياس أحياناً في المسامات أو الفجوات الموجودة في بنية القطعة. ومن أجل ذلك، تشير قيم القساوة إلى متوسط قيم عدة قراءات لقساوة القطعة قيد الاختبار [8].

هناك أكثر من طريقة أو سلم لقياس القساوة وفقاً للمعايير الدولية وأكثرها شمولية هي طريقة فيكرز، إضافة لاختباري روكويل وبرينل كخيار بديل. يحتاج كل من اختباري برينل وفيكرز إلى أن يكون السطح المختبر ذا نعومة مقبولة أما طريقة روكويل، فلا تحتاج لذلك. ويحدد نوع المادة المختبرة وطبيعتها طريقة الاختبار المناسبة. يتم الاتفاق على طريقة القياس وإجرائيته بين المنتج والزبون.



الشكل (٣٤)- تغير القساوة مع الكثافة لقطعة ملبدة من الفولاذ [5].

لتحديد قيمة القساوة، يجب أخذ خمسة قياسات على الأقل، ثم حساب متوسط هذه القيم. وفي حال وجود مادة متعددة المكونات أو تواجد المسامات أو وجود طبقة سطحية رقيقة، يتم، من أجل تحديد القساوة الحقيقية، اللجوء إلى ما يسمى القساوة الميكروية (Microhardness) التي تعتمد على طريقة فيكرز مع حمولات منخفضة تتراوح مابين (0.5– 2000 g)، وتهدف هذه الطريقة إلى عدم اختراق الطبقة أو تحاشي الطور الذي يتم قياسه [3].

- مبدأ طريقة برينل لقياس القساوة (Brinell Hardness HB).

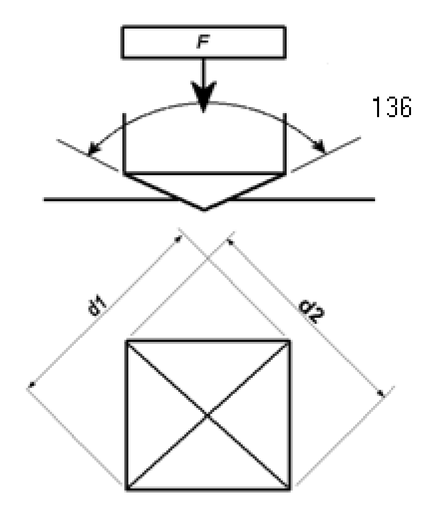
تَستخدم طريقة برينل كرة فولاذية مقساة كأداة للغرز يبلغ قطرها D مقدار 2.5; 5; 10 mm محمولة على جهاز خاص مهمته ضغط الكرة على سطح العينة المختبرة بقوة معينة F لفترة زمنية معينة فتنغرز الكرة في جسم القطعة المختبرة. وعند إزالة الضغط، تترك الكرة أثراً ذا شكل دائري (طبعة) قطره d يتم قياسه بواسطة مجهر مزود بمقياس ميكرومتري ثم حساب مساحته A وقساوة برينل وفق العلاقة [3]:

$$HB = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi D h} = \frac{2F}{\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2})}$$

وقد وضعت جداول خاصة تعطي مباشرة قيمة قساوة برينل HB بدلالة d و D و F .

- مبدأ طريقة فيكرز لقياس القساوة (Vickers Hardness HV).

تستخدم طريقة فيكرز هرم رباعي قائم (قاعدته مربع وزاوية رأسه °136) مصنوع من الماس (أقسى المواد المعروفة). يتم تحميل الهرم الماسي بقوة F على العينة المختبرة لمدة عشر ثوان وقياس مساحة الأثر الناتج في العينة المختبرة (الطبعة الأقرب إلى شكل المعين) بواسطة قياس قطري المعين d_1 ، d_2 باستعمال مقياس ميكرومتري ضوئي وحساب القطر الوسطي d ومساحة الأثر الناتج وقيمة قساوة فيكرز على النحو التالي [3]:



$$HV = \frac{2F\sin\frac{136^o}{2}}{d^2}$$

$$HV = 1.854\frac{F}{d^2}$$

F : القوة المطبقة بواحدة Kg،

d : القطر الوسطي لـ d_1 و d_2 مقدراً بالـ mm.

يشار إلى قيمة قساوة فيكرز وفقاً للحمل المطبق، فمثلاً، تُكتب (HV5) عند تطبيق الحمل 5 kg وهكذا. بالنسبة للمواد الملبدة، عادة ما يُستخدم الحمل 10 kg (HV10) للقساوات العادية، أما للقساوة الميكروية، فمن الأفضل استخدام 0.1 kg (HV0.1) [3].

- مبدأ طريقة روكويل لقياس القساوة (Rockwell Hardness HR).

تَستخدم طريقة روكويل مخروط ماسي زاوية رأسه 120° لقياس المواد القاسية وكرة فولاذية مقساة بقطر 1.59 mm للمواد الطرية ومتوسطة القساوة. ويختلف مبدأ هذه الطريقة عن الطرق السابقة حيث يقاس فقط مقدار عمق الغرز الذي يتناسب عكسياً مع القساوة. لذلك، تعطي أجهزة روكويل قيم القساوة مباشرة وسريعاً، أما الأحمال المطبقة هنا فهي كبيرة وضمن المجال (60–150 kg) وهذا ما لا يناسب قيم القساوات في العينات الملبدة باستثناء المواد الكربيدية والسيراميكية والمعالجة حرارياً بالتقسية الكلية.

تم تقسيم القياس بطريقة روكويل إلى عدة مجالات بحسب التطبيق وقساوة المعادن المختبرة والأحمال المستخدمة، فهناك المجال HRB للمعادن الطرية (ألمنيوم– نحاس– فولاذ غير مقسى) ويتراوح بين (41–99) ، والمجال HRC للخلائط القاسية وفولاذ العدة المقسى ويتراوح بين (20–68)، أما المجال HRA، فهو يتراوح بين (60–93) ويُستخدم للكربيدات والسيراميك مع حمل مطبق قدره 60 kg حرصاً على عدم تحطم العينات نظراً لقصافتها [3] ، [ASTM–E18].

هناك جداول تحويل تربط بين قيم القساوات ومكافآتها في الطرائق الثلاثة كما هو موضح في الجدول رقم (٦) وذلك حسب [ASTM–E140].

الجدول رقم (٦)- جدول تحويلات قيم القساوة بين طرائق القياس – [ASTM E140].

Hardness Conversion Table

HRC-HV-HB-HRA-HRB for carbon / alloy steels. In accordance with Table in ASTM A 370 – 03a

HRC Diamond penetrator	HV Vickers 30	HB Brinell 3000 Kgf	HRA Diamond penetrator	HRB Ball 1/16"	HV Vickers 30	HB Brinell 3000 Kgf	HRA Diamond penetrator
68	940	--	85.6	100	240	*240*	*61.5*
67	900	--	85.0	99	234	*234*	*60.9*
66	865	--	84.5	98	228	*228*	*60.2*
65	832	739	83.9	97	222	222	59.5
64	800	722	83.4	96	216	216	58.9
63	772	706	82.8	95	210	210	58.3
62	746	688	82.3	94	205	205	57.6
61	720	670	81.8	93	200	200	57.0
60	697	654	81.2	92	195	195	56.4
59	674	634	80.7	91	190	190	55.8
58	653	615	80.1	90	185	185	55.2
57	633	595	79.6	89	180	180	54.6
56	613	577	79.0	88	176	176	54.0
55	595	560	78.5	87	172	172	53.4
54	577	543	78.0	86	169	169	52.8
53	560	525	77.4	85	165	165	52.3
52	544	512	76.8	84	162	162	51.7
51	528	496	76.3	83	159	159	51.1
50	513	482	75.9	82	156	156	50.6
49	498	468	75.2	81	153	153	50.0
48	484	455	74.7	80	150	150	49.5
47	471	442	74.1	79	147	147	48.9
46	458	432	73.6	78	144	144	48.4
45	446	421	73.1	77	141	141	47.9
44	434	409	72.5	76	139	139	47.3
43	423	400	72.0	75	137	137	46.8
42	412	390	71.5	74	135	135	46.3
41	402	381	70.9	73	132	132	45.8
40	392	371	70.4	72	130	130	45.3
39	382	362	69.9	71	127	127	44.8
38	372	353	69.4	70	125	125	44.3
37	363	344	68.9	69	123	123	43.8
36	354	336	68.4	68	121	121	43.3
35	345	327	67.9	67	119	119	42.8
34	336	319	67.4	66	117	117	42.3
33	327	311	66.8	65	116	116	41.8
32	318	301	66.3	64	114	114	41.4
31	310	294	65.8	63	112	112	40.9
30	302	286	65.3	62	110	110	40.4
29	294	279	64.6	61	108	108	40.0
28	286	271	64.3	60	107	107	39.5
27	279	264	63.8	59	106	106	39.0
26	272	258	63.3	58	104	104	38.6
25	266	253	62.8	57	103	103	38.1
24	260	247	62.4	56	101	101	37.7
23	254	243	62.0	55	100	100	37.2
22	248	*237*	*61.5*	54	--	--	36.8
21	243	*231*	*61.0*	51	--	**94**	35.5
20	238	*226*	*60.5*	49	--	**92**	34.6

Values shown in bold fall outside the ASTM table but they are still reliable

Values shown in italics are due to passage from table 2 to table 3 of AS

Rockwell Hardness	**HRC** diamond penetrator 120° load 1470 N (150 kgf) duration 30 seconds	Rockwell Hardness	**HRA** diamond penetrator load 588 N (60 k duration 30 seconds
Vickers Hardness	**HV** diamond penetrator 136° load 294 N (30 kgf) duration 15 seconds'	Rockwell Hardness	**HRB** ball 1/16" load 980 N (100 kgf) duration 30 seconds
Brinell Hardness	**HB** ball 10 mm load 29,400N (3000 kgf) durata 15 seconds		

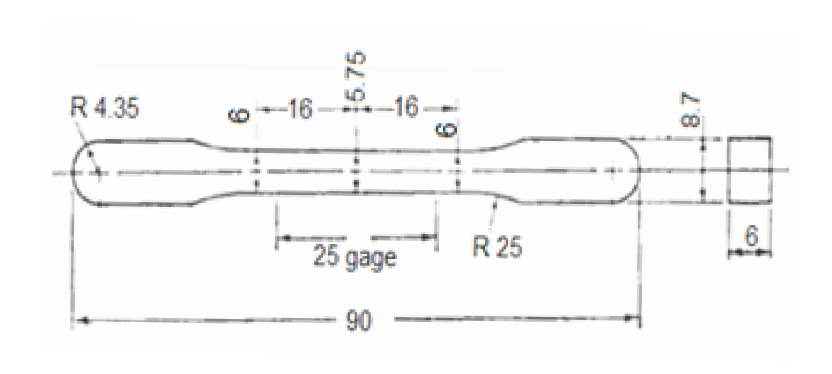
١-١٥-٣-٢ **مقاومة الشد** (Tensile strength).

تتأثر خواص الشد في القطع الملبدة بالمسامية، وتكون أقل في المواد المسامية عنها في المواد التقليدية عند ثبات باقي خواص البنية، ولما كانت القطع الملبدة صغيرة نسبياً وذات شكل معقد وتنتج بطرائق انتاج خاصة، فمن الصعب الحصول منها على عينات مناسبة لتحديد مقاومة الشد. لذلك، يتم اللجوء إلى تصنيع العينات الخاصة بواسطة الكبس والتلبيد.
يتم الاختبار على آلة الاختبار الميكانيكية العامة حيث يتم قياس أبعاد مقطع العينة وحساب مساحته وتثبيت العينة بواسطة فكي الشد ثم تطبيق التحميل بسرعة محددة ورسم منحني الشد بين القوة (نيوتن) والاستطالة (مم) حتى تحطم العينة بواسطة الحاسب الموصول مع جهاز الشد. يتم حساب مقاومة الشد σ_{MAX} من العلاقة:

$$\sigma_{MAX} = F_{MAX} / A$$

حيث F_{MAX} : القوة العظمى التي تحملتها العينة (نيوتن N)،
A : مساحة مقطع العينة (mm^2)،
σ_{MAX} : الاجهاد الأعظم (ميغا باسكال MPa).

يظهر الشكل (٣٥) عينة شد قياسية خاصة بتعدين المساحيق و أبعادها (mm) وذلك حسب المواصفة ASTM E8-04.



الشكل (٣٥)- عينة شد قياسية حسب المواصفة ASTM E8-04 [1].

١-١٥-٣-٣ مقاومة الإنعطاف (Bending Strength).

يتم هذا الاختبار على آلة الاختبارات الميكانيكية العامة، حيث تؤخذ العينات ويقاس عرضها وسماكتها بدقة ثم توضع على جهاز اختبار الانعطاف- ثلاث نقاط الموضح في الشكل (٣٦). يتضمن الجهاز مسندين اسطوانيين مصقولين جيداً من الفولاذ المقاوم للصدأ بقطر 25.4 mm يتوضعان على منزلقات بحيث يمكن التحكم في المسافة بينهما بواسطة مسطرة مدرجة. توضع العينة فوق المسندين ويطبق الحمل من الأعلى بواسطة قضيب اسطواني له القطر والنوعية نفسها، ويتم زيادة الحمل حتى انكسار العينة.

تحسب مقاومة الانعطاف بالعلاقة [1] .

$$S = \frac{3\,P\,L}{2\,t^2\,W}$$

حيث:

S مقاومة الانعطاف (Bending Strength) وتقدر بـ (N/mm^2) أو ميغا باسكال،

P: القوة العظمى اللازمة لكسر العينة مقدرة بـ (N)،

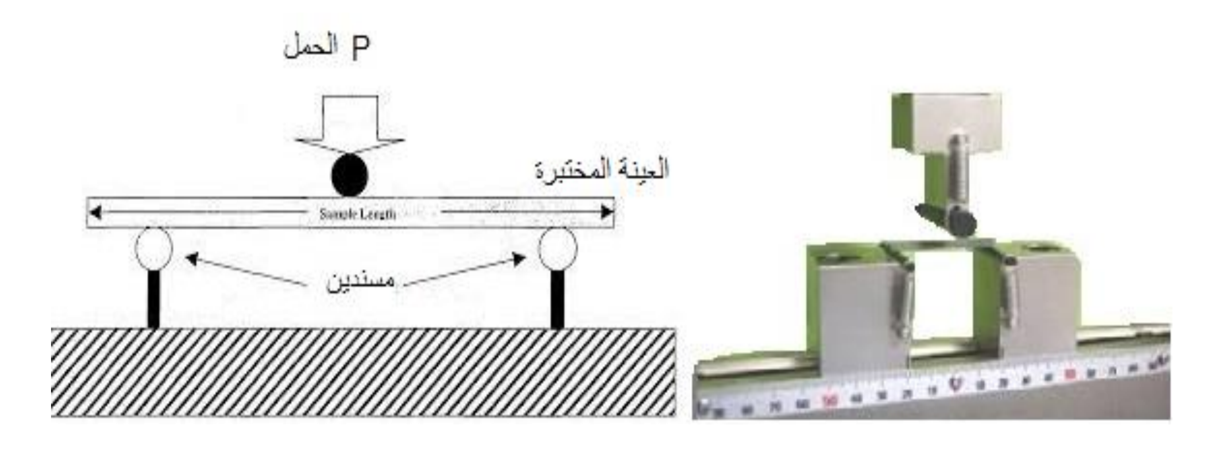
L: البعد بين المسندين مقدراً بـ (mm)،

W : عرض العينة مقدراً بـ (mm)،

t :سماكة العينة مقدرة بـ (mm)،

ويجب اختبار خمس عينات كحد أدنى وحساب المتوسط الحسابي لها [3].

ويجري اختبار المقاومة الميكانيكية على الانعطاف في ٣ نقاط للعينات من الكربيد الملبد وفقاً للمواصفة ASTM B-528.



الشكل (٣٦)- أداة اختبار الإنعطاف ثلاث نقاط حسب ASTM E290 [1].

١-١٥-٣-٤ طاقة الصدم أو المتانة (Impact Energy – Toughness).

تحدد طاقة الصدم وفق اختبار شاربي أو ايزود (Sharpy test or Izod)، حيث يتم في المواد التقليدية تنفيذ ثلم في وسط العينة، الأمر الذي لا يعدُّ ضرورياً في المواد الملبدة.
تكون أبعاد العينة القياسية في اختبار شاربي 10X10X55 mm بينما تكون أبعاد العينة القياسية في اختبار إيزود 10X10X75 mm.
يهدف هذا الاختبار إلى تحديد متانة المادة المختبرة عن طريق قياس الطاقة الممتصة اللازمة لتحطم العينة لدى تطبيق قوة صدم عليها ضمن شروط معينة (طريقة التحميل – معدل التحميل – درجة حرارة العينة – الشكل الهندسي للعينة – عمق الثلم وعرضه إن وجد).
تكون قيم اختبار الصدم ونتائجه للمواد الملبدة منخفضة ولكن يمكن اعتمادها كقيم تقريبية في تحديد متانة المادة – ASTM E812 [1].

١-١٥-٣-٥ خواص التعب (Fatigue Properties).

يعدُّ تأثير المسامية للمواد الملبدة أكثر أهمية في اختبار التعب منه في الاختبارات الميكانيكية الأخرى. وتستخدم في اختبار التعب عينات اختبار الشد العادي نفسها، وكذلك، يمكن اجراء اختبار التعب بواسطة اختبار الانعطاف [1].

١-١٥-٤ الفحص المجهري.

يعدُّ الفحص المجهري ضرورياً في المنتجات الملبدة وذلك من أجل فحص نوع المسامات وشكلها (morphology) التي تؤثر في الخواص المتعددة للمنتج ودراسة الأطوار المتشكلة. غير أنه يجب الانتباه إلى احتمال تغير بعض خواص السطح أثناء تحضير العينات مثل:

- تفتت المادة عند حواف المسامات،
- حدوث انغلاق كلي أو جزئي للمسامات نتيجة التشوه اللدن للمادة أثناء الجلخ،
- تشوه الشكل الدائري لحواف المسامات.

يتضمن تسلسل خطوات إجراء الفحص المجهري ما يلي:

أ- قص العينة: يتم بواسطة قرص منشار دائري على البارد (مع تبريد بالماء) مع الانتباه إلى إبعاد بقايا عملية النشر عن سطح العينة وتنظيفها بالماء.

ب- الجلخ : ويتم على آلة جلخ أو صقل العينات بسرعات دوران متعددة باستخدام أوراق جلخ من كربيد السيليكون متدرجة الخشونة من الأخشن إلى الأنعم مع استخدام الماء للتبريد.

ت- الصقل : ويتم على الآلة السابقة نفسها مع استبدال أوراق الجلخ بقرص من اللباد أو القماش الناعم مع وضع معجون ألماس أو مسحوق الألومينا فائق النعومة خلال الصقل.

ث- المعالجة الكيمائية أو التنميش: تتم بواسطة الغمر في محلول كيميائي لمدة زمنية محددة لتسهيل دراسة الخليطة وإظهار حدود الحبيبات والأطوار المختلفة. ويتعلق تركيب المحلول الكيميائي بنوع مادة العينة قيد الاختبار، وفي بعض الحالات ، يمكن تجاوز هذه المرحلة حيث يمكن رؤية البنية بوضوح دون إجراء المعالجة الكيميائية [1].

ويعتمد نجاح إظهار البنية على تباين معدلات التفاعل بين محلول الكاشف المستخدم والأطوار المختلفة للبنية. وفي حالة الكربيد الملبد، يمكن أن تشتمل الأطوار على:

- ✓ كربيد التنغستن WC (α phase) ،
- ✓ الكوبالت Co (β phase) Binder ،
- ✓ كربيدات أخرى مكونة من (Ti,Ta,Nb,W)C (γ phase) ،
- ✓ أطوار متشكلة كالطور (η ايتا) أو ما يعرف [(Co_3W_3C (M_6C), Co_6W_6C ($M_{12}C$)] .

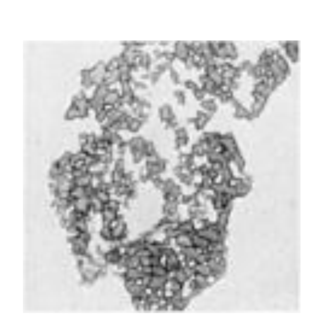
لإظهار البنية والأطوار في الخليطة WC- 8W%Co، هناك، حسب المواصفة ASTM-B390 و ASTM-B 657 ، ثلاث كواشف تستخدم لهذا الغرض وأهمها [11]:

- كاشف موراكامي (Murakami's reagent): $10g\ K_3Fe(CN)_6$,10g NaOH,100 mℓ H_2O
- كاشف ذو أساس من كلوريد الحديد Ferric chloride $3\ g\ FeCl_3$, 100 mℓ H_2O.

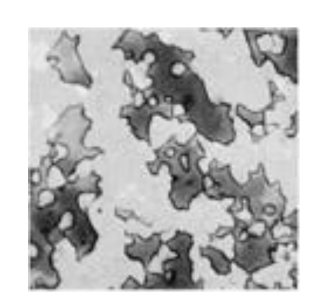
يمكن أن يظهر الطور η المتشكل بعد التلبيد من خلال التنميش بهذا المحلول والتكبير 500X وفق الشكل (٣٧- أ).

ويُظهر الشكل (٣٧- ب) عند التكبير 1500X الطور η $(Co_3W_3)C$ باللون الرمادي القاتم مع حدود سوداء اللون وخلفية رمادية لحبيبات WC الزاويّة وطور الكوبالت باللون الأبيض.

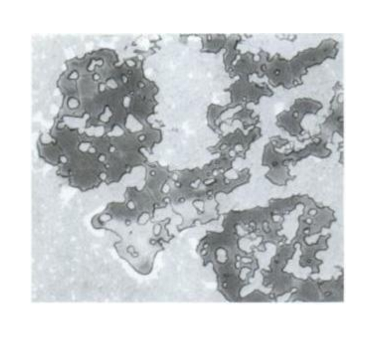
كما يبين الشكل (٣٧-جـ) بتكبير 1500X تفاصيل الطور η الذي يبدو متدرج اللون الرمادي مع حدود حبيبات واضحة، أما حبيبات WC ، فهي تبدو رمادية فاتحة محاطة بالطور η وشبه دائرية نتيجة انحلال الكوبالت حولها.



(أ) مكبر 500X



(ب) مكبر 1500X



(جـ) تكبير 1500X

الشكل (٣٧)- الطور η $(CO_3W_3)C$ [11].

١- ١٦ المساحيق والمواد الكربيدية.

الكربيدات المعدنية (Metal Carbides).

لقد أحدث تطوير الكربيدات المعدنية ثورة في العديد من القطاعات الهندسية، فقد حلت هذه الكربيدات محل فولاذ العدة الكربوني وفولاذ سريع القطع HSS في مصانع التشغيل.
ونتيجة استعمال الكربيدات الملبَدة، ارتفعت قيم مقاومة الاحتكاك وسرعات القطع لدرجة كبيرة، إضافة إلى تحسن عمليات الانهاء السطحي والصقل وزيادة الدقة واستقرار الأبعاد للأجزاء و الأدوات و تحسن أدائها خلال ظروف العمل عند مجال حراري واسع.
من حيث التصنيف، تتدرج الكربيدات عموماً تحت فصيلة المواد السيراميكية غير الأوكسيدية، وهي عبارة عن مركب كيميائي مكون من الكربون C وعنصر أقل كهرسلبية. وهي مواد مسحوقية فائقة النعومة تمتاز بقساوتها العالية (التي تقع في المجال HRA 95-80) وبمقاومتها للحرارة العالية (Refractoriness) بفضل درجة حرارة انصهارها العالية وللتآكل الكيميائي. ومن أهم الكربيدات استخداماً في الصناعة نذكر:
كربيد التنغستن؛ كربيد السيليكون؛ كربيد التيتانيوم؛ كربيد الألمنيوم؛ كربيد البور؛ كربيد الكروم .... إلخ.
إن تحويل هذه المساحيق الكربيدية إلى منتجات نهائية هو من أحد أهم التطبيقات المعروفة لطرائق تعدين المساحيق المتنوعة التي تم شرحها ولا سيما طريقة التلبيد في الطور السائل.

يبين الجدول رقم (٧) درجات حرارة انصهار أهم الكربيدات المعروفة ومعادنها.

الجدول رقم (٧)- درجات حرارة انصهار بعض الكربيدات ومعادنها [12].

		Melting Point (°C)	
		Carbide	Metal
Group IV	TiC	3067	1660
	ZrC	3420	1850
	HfC	3928	2230
Group V	VC	2830	1890
	NbC	3600	2468
	TaC	3950	2996
Group VI	Cr_3C_2	1810	1865
	Mo_2C	2520	2620
	WC	2870	3410

تطبيقات الكربيدات.

هنالك مجموعة من التطبيقات العامة والخاصة للكربيدات أهمها:

- ✓ صناعة أدوات القطع والتشغيل الميكانيكي للمواد القاسية وصناعة بعض أجزاء القوالب ودرافيل سحب المعادن وتشكيلها،
- ✓ رؤوس أدوات الحفر في مجال النفط والبناء التي تتطلب مقاومة اهتراء ومتانة عاليتين،
- ✓ صناعة الصمامات وقواعدها وفوهات النفث المقاومة للحرارة والصدمات الحرارية والتآكل،
- ✓ الطلاءات ذات المقاومة العالية للحرارة والضغط كما في أجزاءِ المحرك النفّاثِ،
- ✓ قضبان التسخين والبواتق المستخدمة في أفران الصهر وأفران المعالجات الحرارية،
- ✓ بعض التطبيقات الخاصة كأجهزة الصقل والتلميع فوق الصوتي التي تتطلب مقاومة حت عالية (Ultrasonic polishing).

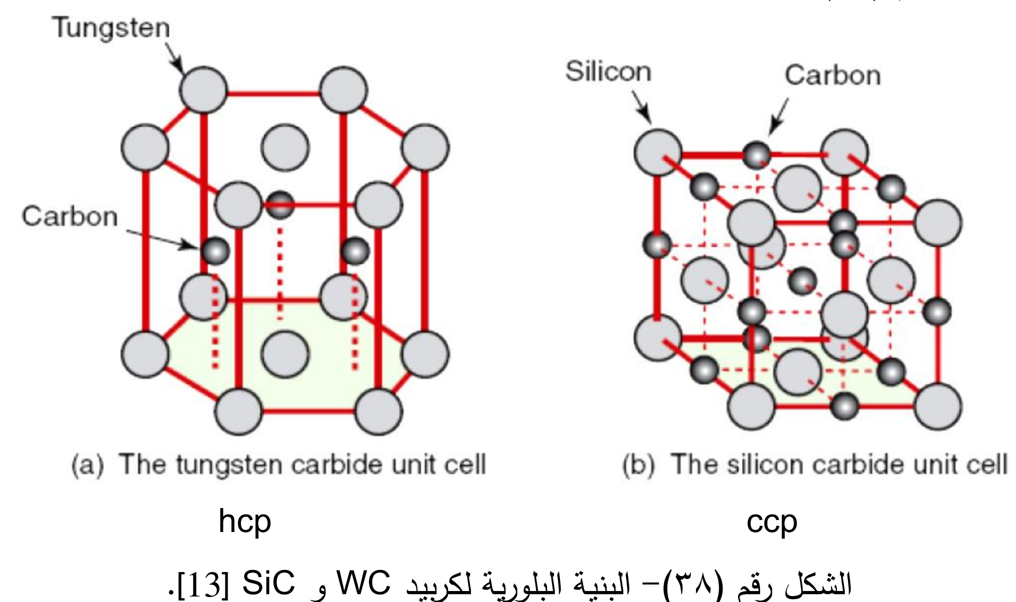
التركيب البلوري للكربيدات.

تتمتع المواد الكربيدية ببنية بلورية تشتمل عموماً على نوعين أساسيين يمثلان بنية معظم أنواع الكربيدات المعروفة هما:

١ - بنية مكعبة متراصة (ccp) مشابهة للبنية البلورية لملح الطعام NaCl مثل كربيد السيليكون SiC،

٢- بنية سداسيةً متراصة (hcp) مثل كربيد التنغستن WC.

يبين الشكل رقم (٣٨) هاتين البنيتين [13].



الشكل رقم (٣٨)- البنية البلورية لكربيد WC و SiC [13].

طرائق إنتاج المساحيق الكربيدية.

يتم إنتاج الكربيدات عبر كربنة مساحيق المعادن أو مساحيق أكاسيدها بواسطة مسحوق الكربون الصلب أو الغازات الحاوية على الكربون [5].

- **طرائق انتاج مسحوق كربيد التنغستن WC.**

١- الطريقة التقليدية: تعتمد على مساحيق معادنها مباشرة عبر مزج مسحوق المعدن مع هباب الفحم النقي ضمن حاوية من الغرافيت توضع في فرن كهربائي أنبوبي بحدود 1300 °C ضمن جو من غاز الهيدروجين. تتم عملية كربنة مسحوق المعدن ضمن جو مرجع من غاز H_2 حسب المعادلة:

$$W + C \xrightarrow[1300\ ^\circ C]{H2} WC$$

بعد تبريد كربيد المعدن، تتم عملية فصل حبيبات الكربيد المتكتلة مع بعضها بواسطة مطحنة الكرات ثم تنخيلها باستخدام مناخل الفرز. تعطي هذه الطريقة حبيبات كربيدية خشنة نسبياً.

٢- الطريقة الحديثة: تعطي هذه الطريقة واسعة الانتشار مسحوقاً بنقاوة عالية عبر اختزال ثالث أكسيد التنغستن WO_3 (الذي يتم استحضاره بواسطة ازالة الماء من حمض التنغستن H_2WO_4) بواسطة الهيدروجين حيث يسخن WO_3 في فرن كهربائي انبوبي عند 900 °C بوجود مسحوق (هباب الفحم) تحت جو غاز الهيدروجين كي يتحول إلى مسحوق التنغستن الحر. يتبع ذلك عملية كربنة مباشرة في جو من H_2 عند 1700 °C للحصول على WC.

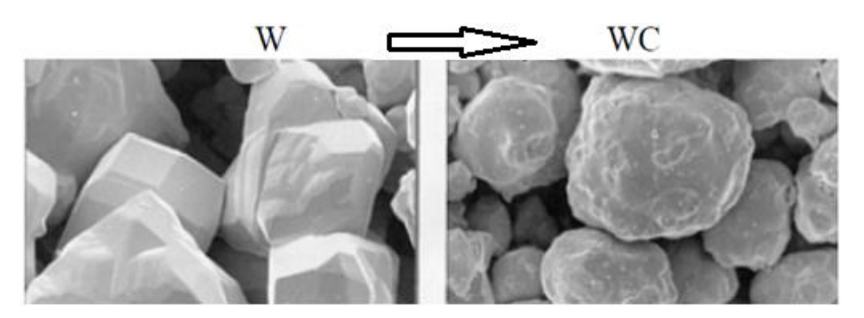
٣- الطريقة الثالثة: عبر تسخين سداسي كلور التنغستن ضمن جو غاز الهيدروجين وغاز الميتان كمصدر للكربون عند الدرجة 670 °C.

$$WCl_{6(g)} + H_{2(g)} + CH_{4(g)} \rightarrow WC_{(S)} + 6\ HCl_{(g)}$$

أو عبر تسخين سداسي فلور التنغستن باستخدام الميتانول كمصدر غني بالكربون والتسخين عند 350 °C.

$$WF_{6(g)} + 2\ H_{2(g)} + CH_3OH_{(l)} \rightarrow WC_{(S)} + 6\ HF_{(g)} + H_2O_{(g)}$$

وتكون مواصفات الحبيبات في هذه الطريقة عالية النعومة وتتراوح بين (0.7 –0.1) ميكرون.



الشكل (٣٩)- البنية المجهرية لحبيبات مسحوق التنغستن وكربيد التنغستن [5].

- **طرائق انتاج مسحوق كربيد التيتانيوم TiC.**

يتم إنتاج كربيد التيتانيوم بتسخين خليط من أكسيد التيتانيوم وهباب الفحم في جو من الهيدروجين أو جو مفرغ من الهواء في درجات حرارة عالية (2000 °C) حسب المعادلة:

$$TiO_{2(s)} + 3C_{(s)} \rightarrow TiC_{(S)} + 2\ CO_{(g)}$$

- **طرائق إنتاج مسحوق كربيد السيليكون SiC.**

المادة الأولية لإنتاج هذا الكربيد هي السيليكا SiO_2 الذي يكربن حسب المعادلة التالية:

$$SiO_{2\ (S)} + 3C_{\ (S)} \rightarrow SiC_{\ (S)} + 2\ CO_{\ (g)}$$

تكون حبيبات الكربيد التي يتم إنتاجها متفاوتة في الحجم ويمكن تصنيفها استناداً إلى حجم حبيباتها وفق الفئات التالية:

- حجم حبيبات ناعم جداً أقل من (1 µm)،
- حجم حبيبات ناعم (1 µm) ،
- حجم حبيبات متوسط (1-2 µm)،
- حجم حبيبات خشن (2-5 µm) ،
- حجم حبيبات خشن جداً أكبر من(5 µm).

يزداد معدل حجم حبيبات الكربيدات بعد عملية التلبيد مقارنة مع حجم حبيبات المسحوق الأصلي قبل التلبيد.

١-١٦-١ لمحة عن كربيد التنغستن.

مسحوق كربيد التنغستن هو مركب كيميائى لاعضوي صيغته الكيميائية WC ويحتوي على عدد متساو من ذرات التنغستن والكربون، وللتبسيط يطلق على هذا المركب الإسم الشائع كربيد. وفي حالته الأساسية، يكون لونه رمادياً مائلاً للاسود وهو لا ينحل في الماء كما تعدُّ حبيباته فائقة النعومة والقساوة. وتعادل قساوته الفريدة ثلاثة أضعاف قساوة الفولاذ وتقدر بحوالي2400 -1700 فيكرز أي مايعادل (92 HRA) ويبلغ معامل مرونته 600 GPa. يتميز أيضاً بكثافته العالية التي تبلغ $15.7\ g/cm^3$ وبمقاومة ضغط عالية وثباتية كبيرة في الأبعاد.
يتم تحويله إلى منتجات بأحد طرائق تعدين المساحيق المعروفة ويمكن تلميعه وصقله حتى قيم عالية جداً من النعومة باستخدام أدوات من الماس [5].
لم ينجح المكتشف Henri Moissan الحائز على جائزة نوبل ومخترع الفرن الكهربائي وبعد محاولاته الحثيثة في مختبره الكيميائي بجامعة باريس في تصنيع الألماس الصناعي، لكنه ما لبث أن نجح في اكتشاف النوع الأول من كربيد التنغستن عام 1896 وهو W_2C (ثنائي كربيد التنغستن). بعد ذلك، اكتشف زميله P. Williams عام 1898 الكربيد WC.

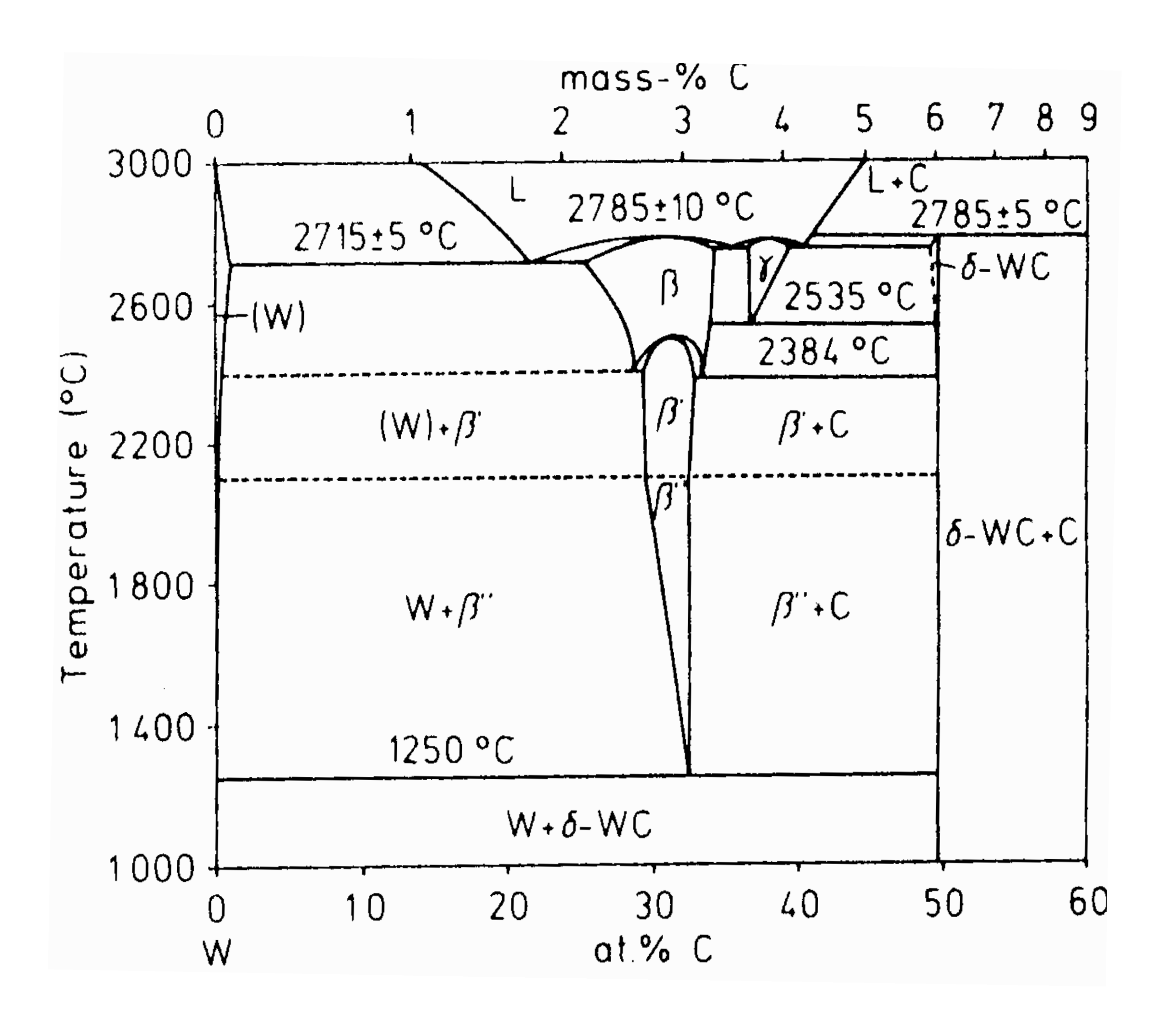
من حيث البنية البلورية، يمكن أن نميز طورين لكربيد WC هما:

- الطور α: بنية سداسية متراصة hcp،

- الطور β (طور درجات الحرارة العالية): بنية مكعبة متراصة ccp مشابهة لبنية ملح الطعام.

يعدُّ كربيد التنغستن من أكثر المواد مقاومة لدرجات الحرارة العالية وتغيراتها، ويحتفظ بمعظم خواصه الأساسية كالقساوة والمتانة ومقاومته للتآكل الكيميائي حتى درجة حرارة (بحدود 700°C). يبدأ التأكسد عند 550 °C في جو مؤكسد وعند 850 °C في جو واق ويعدُّ مقاوماً لمعظم الحموض عند درجات الحرارة العادية ولا يتفاعل مع الهيدروجين الجاف حتى درجة حرارة الانصهار. لذلك، يستخدم الهيدروجين كجو خامل عند تلبيد الكربيد. يبدأ بالتفكك والانصهار عند الدرجة 2800 °C، أما درجة غليانه، فتبلغ 6000 °C. وبسبب خواصه الميكانيكية العالية وتحمله للصدمات الحرارية، استخدم في التطبيقات الصناعية التي يمكن أن تتغير معدلات الحرارة فيها بشكل مفاجئ كطلاء المحركات النفاثة وأدوات القطع [5].

يبين الشكل رقم (٤٠) مخطط توازن الأطوار للجملة الثنائية W–C حيث يمكن معاينة كافة الأطوار والمحاليل الصلبة المتشكلة من W–C عند مجالات درجات الحرارات العالية [14].



الشكل (٤٠)- مخطط توازن الأطوار للجملة الثنائية W–C [12، 9].

١-١٦-٢ المواد المركبة معدن- كربيد (Composite materials metal –carbide).

توصف الكربيدات بقساوتها الفريدة، فالمساحيق الكربيدية تعدُّ مواداً قصفة نسبياً ولا يمكن تحويلها بمفردها عبر أساليب تعدين المساحيق إلى منتجات ذات خواص ميكانيكية نهائية بسبب قصافتها وقساوتها الفائقة. فمقاومة الاهتراء المرغوبة عموماً لا تكفِ، ويجب أن تترافق مع مقاومة ميكانيكية كافية من أجل تماسك البنية وإطالة عمر الأداة. ومن أجل تأمين هذه الخاصية، تم دمج خواص المعادن ذات المطيلية العالية مع الكربيدات لتكوين مزيج متجانس ومتكامل تشكل فيه حبيبات الكربيد المكون المقوي ويشكل المعدن المكون الرابط (Matrix).

تنتمي فئة المواد معدن- كربيد بين المواد المركبة إلى مجموعة المواد القاسية المقاومة للحرارة (refractory Hard materials) والاهتراء (wear–resistant). وتتميز هذه المواد بخمولها الكيميائي ومقاومتها للأكسدة عند درجات الحرارة العالية إضافة إلى ناقليتها الكهربائية العالية.

تعتمد الخواص النهائية للمواد المركبة (معدن - كربيد) إلى حد بعيد على بنية وتركيب الطور النهائي المتشكل بعد التلبيد.

تم تصنيع هذه المواد وتطويرها لأول مرة في أوائل عام ١٩٢٠ في ألمانيا تلبية للطلب المتزايد على أدوات قوالب سحب فتيل مصابيح الإنارة ذات الكلفة العالية التي كانت تصنَّع من مادة الألماس نظراً لخصائصه العالية في مقاومة الاهتراء والسحل. كما استخدمت بشكل واسع كعناصر تسخين حرارية للأفران، وجرت عملية التصنيع عبر ربط حبيبات الكربيدات القاسية مع بعضها بواسطة رابط معدني لدن وطري (ductile) باستخدام معدن الكوبالت للمرة الأولى كرابط بين حبيبات الكربيد عبر طريقة التلبيد في الطور السائل ذات معدل الانتشار العالي.

وقد لقبت المادة الجديدة المكتشفة عام ١٩٢٣ بالاسم الشهير (WIDIA) أو مايعرف اليوم (Cemented carbide).

لقد حلت الكربيدات محل الأدوات المصنعة من الماس نظراً لرخص كلفتها وأدائها العالي طوال فترة خدمتها حتى عند الحرارات العالية. وقد استخدم لاحقاً معادن رابطة ذات مواصفات مشابهه لخصائص الكوبالت كالنيكل والحديد.

تتأثر الخواص الميكانيكية والفيزيائية لهذه الكربيدات بشكل كبير بكل من العوامل التالية: التركيب الكيميائي؛ نسبة محتوى المعدن الرابط؛ حجم حبيبات الكربيد الأولية؛ التوزع الحجمي لحبيبات الكربيدات؛ درجة حرارة التلبيد؛ زمن التلبيد؛ جو التلبيد.

إن الخصائص التي يجب توافرها في المعدن المستخدم لربط حبيبات مسحوق الكربيد هي:

- الألفة الكيميائية الوثيقة مع حبيبات مسحوق الكربيد المراد ربطها،

- درجة حرارة انصهارها العالية نسبياً (1450 – 1500 °C)،
- قابلية تبلل (wetability) عالية أو توتر سطحي منخفض،
- قابلية جيدة للتحبيب agglomeration (تغليف حبيبات الكربيد)،
- قابلية مقبولة لحل حبيبات الكربيد في الطور السائل (يشكل الكوبالت مع الكربيد يوتكتيك عند 1278 °C)،
- لدونة مقبولة (قابلية تشوه عند الكبس) ومتانة عالية على الساخن.

ويعدُّ الكوبالت والنيكل ثم الحديد أهم العناصر التي تحقق الشروط المذكورة والمستخدمة بشكل دائم مع المساحيق الكربيدية.

١-١٦-٣ المواد المركبة WC – Co (Cemented carbide).

تعود البدايات إلى عام ١٩٢٨ في ألمانيا، وبعد الحرب العالمية الأولى حيث تم تصنيع المنتج الأول الذي نال براءة الاختراع في أمريكا وقُدم كأول عمل فريد من نوعه، واستلزمت العملية الكثير من السيطرة والتحكم الدقيق من أجل قولبة النماذج الأولية لخليط مسحوقي الكربيد والرابط المعدني بنسبة (% 13-3 كوبالت). ثم تمت عملية التلبيد في جو واق وعند درجات حرارة كافية ليبدأ الكوبالت بالانصهار وتشكيل محلول صلب مع كربيد التنغستن. شكل مصهور معدن الكوبالت وكربيد التنغستن المنحل جزئياً نسيجاً مترابطاً من الحبيبات القاسية المتماسكة مع بعضها وأعطت المنتج النهائي الخصائص الوظيفية المرغوبة لاستخدامه في التطبيقات الصناعية والعدد.

تتجسد الصعوبة الأساسية في عملية كبس مساحيق الكربيدات الحاوية على مادة رابطة (الكوبالت عادة) من أجل الحصول على مضغوطات ذات كثافة متجانسة على كامل حجمها. ويمكن تعليل ذلك بأن انضغاطية المسحوق تؤثر في شكل المضغوطة وحجمها خلال عملية التلبيد اللاحقة.

وتعدُّ المقاومة الميكانيكية من أهم خواص المضغوطات لأنها تحافظ على تماسك المضغوطة أثناء المداولة وخلال عملية التلبيد اللاحقة.

تتكون مساحيق الكربيدات من جسيمات قاسية جداً، ومن أجل منحها قواماً لزجاً دون فقدان قساوتها، يضاف إلى هذه المساحيق معدناً رابطاً يمتاز باللدونة والمتانة العاليتين ويكوِّن النسيج الرابط، مما يساعد على رفع مقاومة القطعة المضغوطة.

في الشروط نفسها ، تتمتع مضغوطات المساحيق الكربيدية فائقة النعومة بمقاومة ميكانيكية أعلى من مضغوطات المساحيق الكربيدية الخشنة.

يبين الجدول رقم (٨) بعض خواص كربيدات المعادن المعروفة والمعادن الرابطة المستخدمة [8].

الجدول رقم (٨)- بعض خواص أشهر الكربيدات المعروفة والمعادن الرابطة المستخدمة [8].

Material	Hardness HV (50 kg)	Crystal structure	Melting temperature (°C)	Theoretical density g/cm³	Modulus of elasticity GPa	Thermal expansion, µm/m•K
WC	2200	Hexagonal	2800	15.63	696	5.2
W_2C	3000	Hexagonal	2777	17.3	———	———
TiC	3000	Cubic	3100	4.94	451	7.7
VC	2900	Cubic	2700	5.71	422	7.2
HfC	2600	Cubic	3900	12.76	352	6.6
ZrC	2700	Cubic	3400	6.56	348	6.7
NbC	2000	Cubic	3600	7.8	338	6.7
TaC	1800	Cubic	3800	14.50	285	6.3
Cr_3C_2	1400	Orthor-hombic	1800	6.66	373	10.3
Co	<100	Cubic/hexagonal	1495	8.9	207	16.0
Ni	<100	Cubic	1455	8.9	207	15.0

من أجل إعداد وتهيئة مسحوق كربيد التنغستن لعملية التصنيع، يتم تحضير خليط متجانس من حبيبات الكربيد ومعدن الكوبالت (المعدن الرابط)، ويتم ذلك بإضافة نسبة وزنية من الكوبالت إلى مسحوق الكربيد يمكن أن تتراوح بين (3 – 30 wt %). وما يحدد تلك النسبة هو الخواص النهائية المرغوبة وفق التطبيق المطلوب. فبزيادة نسبة معدن الكوبالت الرابط تنخفض القساوة النهائية للمنتج، وبالتالي، يكون الهدف من التطبيق هو الحصول على متانة ميكانيكية عالية مترافقة مع قساوة مقبولة يمكن أن تناسب تطبيقات مثل أدوات وقوالب القص والبلص وولائج تشكيل المعادن والخارق في رؤوس القذائف حيث الحمولات الديناميكية والصدم. أما عندما تكون نسبة معدن الكوبالت إلى كربيد التنغستن منخفضة (% 3 –12 wt) ، تصبح قساوة الخليطة الكربيدية الملبدة عالية وتصلح لمقاومة الاهتراء والسحل العاليين كما في أدوات القطع وتشغيل المعادن وفالات النفث والسفح بالرمل ورؤوس الحفارات.

تؤثر نعومة حبيبات المسحوق الكربيدي المستخدم وحجمها تأثيراً كبيراً في خواص الكربيد الملبد، فمع ازدياد نعومة الحبيبات الكربيدية وصغر حجمها، ترتفع الخواص الميكانيكية عموماً للكربيد الملبد.

يبين الجدول رقم (٩) تغير الخواص الميكانيكية النهائية للكربيد الملبد تبعاً لنسبة الكوبالت إلى الكربيد وحجم الحبيبات [8].

الجدول رقم (٩)– تغير الخواص الميكانيكية تبعاً لنسبة رابط الكوبالت إلى الكربيد [14].

النسبة التركيبية الوزنية	حجم الحبيبات	القساوة HRA	الكثافة g/cm3	مقاومة الشد MPa	مقاومة الانضغاط MPa	معامل المرونة GPa	مقاومة الاهتراء النسبية
97WC-3Co	Medium	92.5-93.2	15.3	1590	5860	641	100
94WC-6Co	Fine	92.5-93.1	15.0	1790	5930	614	100
94WC-6Co	Medium	91.7-92.2	15.0	2000	5450	648	58
94WC-6Co	Coarse	90.5-91.5	15.0	2210	5170	641	25
90WC-10Co	Fine	90.7-91.3	14.6	3100	5170	620	22
90WC-10Co	Coarse	87.4-88.2	14.5	2760	4000	552	7

تتراوح عادة نسبة Co في لقم وأدوات القطع كما يوضح الجدول رقم (٩) بين (3–10 wt %)، وأكثر النسب استخداماً هي النسبة (6– 8 wt %) موضوع دراسة الخليطة في هذا البحث.

بعد تجهيز خليطة الكربيد بالنسب الوزنية المرغوبة تأتي مرحلة كبس الخليطة وتشكيلها حسب الشكل المرغوب ضمن القالب. وبما أن خليطة مسحوق كربيد التنغستن والكوبالت (مثل جميع المواد السيراميكية) ذات حبيبات قاسية جداً، فهي ذات قابلية ضعيفة للانضغاط ومن الصعب الحصول على كثافة متجانسة في جميع مناطق القطعة المضغوطة.

ومن أجل تسهيل وإنجاز عملية كبسها ولفظها من القالب وتداولها وصولاً إلى فرن التلبيد، يتم اللجوء إلى عملية التحبيب (Granulation) عبر تغليف حبيبات الكربيد والكوبالت بمادة رابطة عضوية (Green binder) وظيفتها تسهيل حركة المسحوق أثناء الكبس وإعطاء المضغوطات المتانة الرطبة (الخضراء) الأولية اللازمة للفظ القطع من القوالب وتداولها وصولاً الى مراحل التلبيد إضافة إلى تحسين عملية الكبس. كما يساهم التحبيب في حماية الكربيد من الأكسدة.

تزال المادة الرابطة العضوية بالحرق في المراحل الأولى من عملية التلبيد. وتتألف هذه المادة الرابطة من أحد المواد البوليميرية التالية التي تعمل على لصق وتكتيل الحبيبات ببعضها البعض:

- polyethylene glycol (PEG)،
- polyacrylate ،
- paraffin wax،
- polyvinyl acetate (PVAc)،
- polyvinyl alcohol (PVA).

تكون عادة نسبة الرابط العضوي المستخدمة بين (5– 10 wt %) من نسبة وزن المسحوق الكلي ولا ينصح بزيادتها فوق ذلك بسبب تأثيرها في عملية التلبيد اللاحقة وخواص المنتجات إضافة إلى تغير نسب الانكماش وأبعاد المنتج بعد التلبيد. أما نقصانها فيمكن أن يتسبب في تفتت القطع أثناء اللفظ من القالب والمداولة إلى أفران التجفيف.

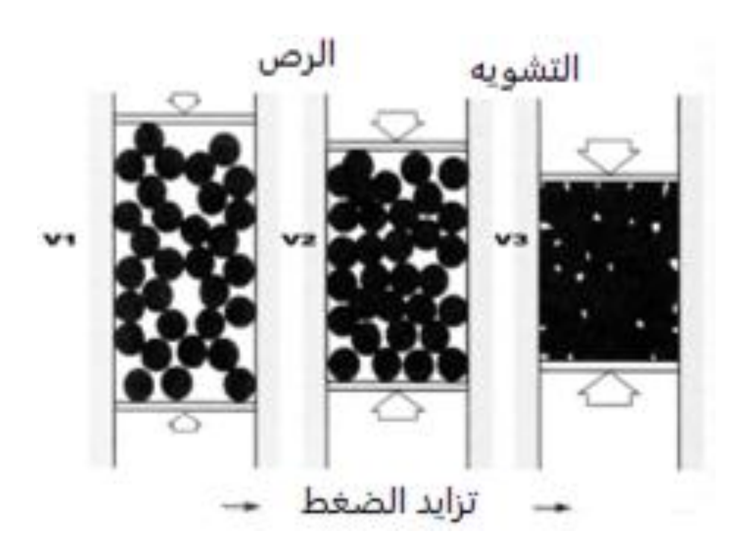
وعند اختيار نوع الرابط العضوي، يجب أن تتوافر فيه الشروط التالية:

- حد أدنى من كمية الرماد المتبقي بعد احتراقه،
- درجة حرارة احتراق منخفضة نسبياً ،
- عدم التسبب باهتراء القالب،
- تحسين متانة المضغوطات الجافة،
- عدم التسبب بالتصاق المضغوطات بجدران القالب،
- سهولة الاحتراق والتبخر دون ترك أثر،
- عدم السمية،
- عدم التأثير على مرحلة التصلب.

تجري عملية الخلط الرطب لخليطة المسحوق في أحد أنواع الخلاطات التي تم شرحها ثم يجفف المسحوق من الرطوبة في الفرن عند درجة حرارة لا تزيد على 100 °C ولمدة زمنية كافية ثم تتم عملية كبس المسحوق المجفف في القالب.

يشكل أسلوب الكبس في القوالب التقنية الرئيسة لكبس خليط مساحيق الكربيدات مع مادة رابطة أو معدن رابط، ويتم العمل في هذا الأسلوب بتعبئة القالب والكبس تحت ضغط خارجي محدد ولمدة زمنية محددة ثم إخراج المضغوطة من القالب [8] .

يبين الشكل رقم (٤١) تراص الحبيبات خلال مرحلة كبس المسحوق.



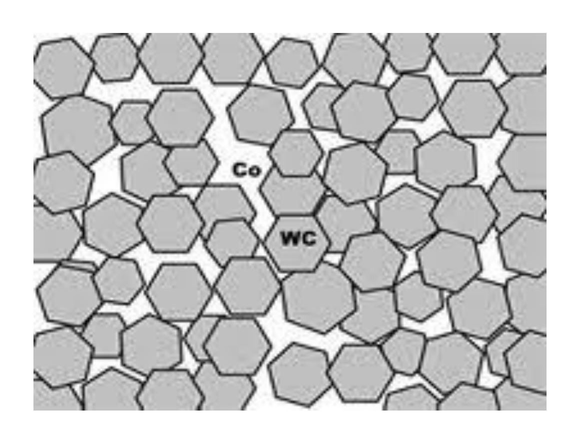
الشكل رقم (٤١)– تراص الحبيبات خلال مرحلة الكبس [8].

أساسيات عملية تلبيد الكربيدات المعدنية.

تعدُّ عملية التلبيد العملية الأساسية النهائية لتصنيع مساحيق الكربيدات الصلدة. وتجري عملية تلبيد المضغوطات المكبوسة من الكربيدات وفقاً لاسلوب التلبيد في الطور السائل ذات معدل الانتشار العالي والتي تعطي كثافة وتجانسية عظمى حيث يظهر الشكل (٤٢) بنية كربيد التنغستن والكوبالت بعد التلبيد.

وتتم العملية بالتسخين وفق معدل مضبوط الى درجات حرارة ما بين 1500 –1350 درجة مئوية وابقائها في هذه الدرجات لفترة زمنية محددة ومن ثم تبريدها بمعدل مضبوط أيضاً.

والهدف من التلبيد هو تقوية وتمتين المضغوطات المكبوسة، بحيث تكتسب الخواص الميكانيكية المطلوبة منها [8].



http://www.carbidetechnologies.com/questions.php

الشكل (٤٢)– بنية الخليطة WC–Co بعد التلبيد (10% Co) [9].

و أثناء عملية التلبيد يحدث ما يلي:

أ – زيادة حركة الذرات،

ب– إعادة التبلور،

ت – تبادل المواقع بين الجسيمات،

ث– تغيرات في أسطح الجسيمات،

ج – تغيرات في الخواص الميكانيكية،

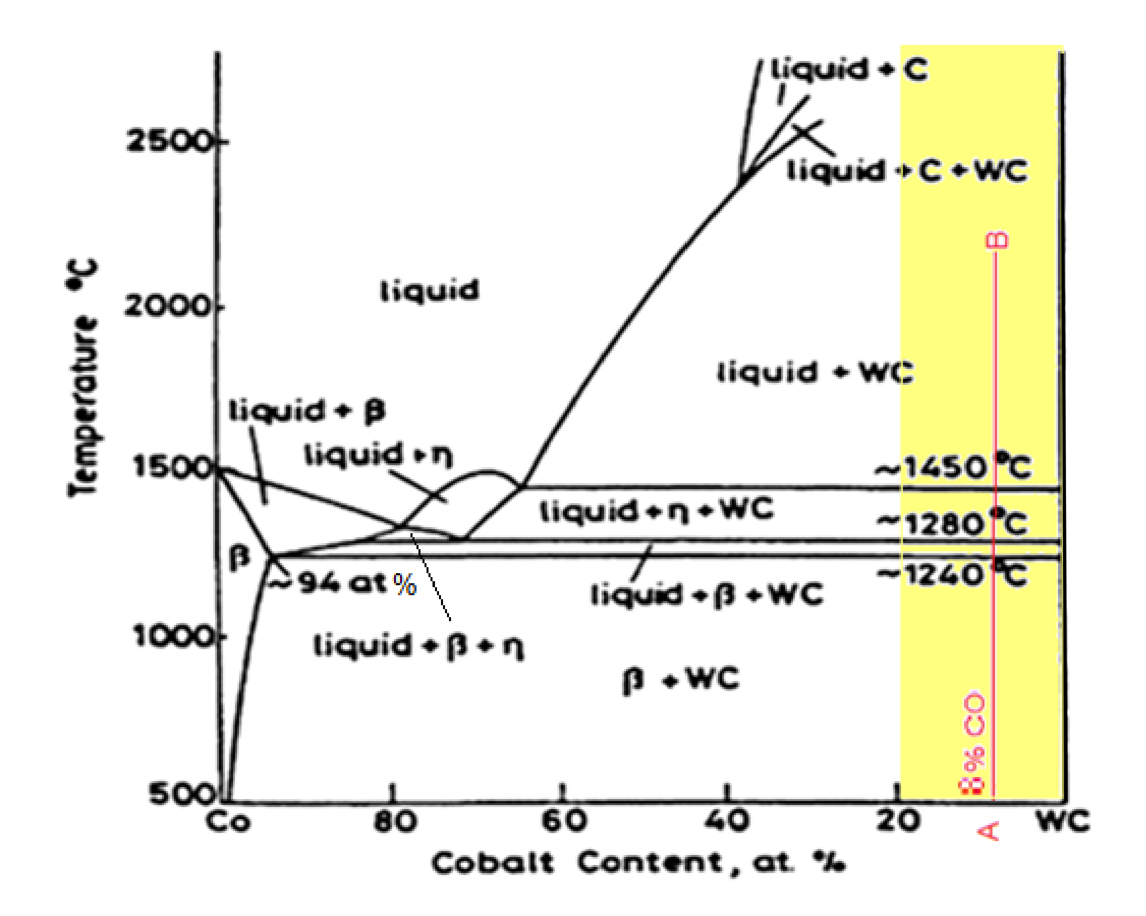
ح – تغير في سطح التماس بين الجسيمات،

خ – ازالة الاجهادات الداخلية.

١-١٦-٤ مخطط الأطوار (الحالة) WC – Co.

تعتمد خواص كربيد التنغستن الملبّد إلى حد كبير على تركيب بنيته النهائية، وإن أيّ انحراف طفيف في نسبة الكربون عن محتوى الكربون المثالي، يؤدي إلى ظهور كمية من طور الغرافيت أو مركبات هشة ثلاثية الطور، وكلاهما غير مرغوب به، وغالباً ما يكون سبباً لتدهور الخواص الميكانيكية وأداء أدوات القطع. وطبقاً لذلك، يجب المحافظة على محتوى الكربون في الخليطة أثناء التلبيد ضمن حدود ضيقة للحصول على المركب المطلوب ذي الخواص الأفضل [9]

يلاحظ في المخطط الموضح بالشكل رقم (٤٣) ظهور طورين هما الطور β (محلول كربيد التنغستن في الكوبالت) وهو الطور المتين، والطور η الهش بنوعيه (Co_3W_3C) M_6C و (Co_6W_6C) ($M_{12}C$) إضافة الى طور الكربيد WC حيث يعتمد تشكل أحد هذين الطورين على نسبة محتوى الكربون الحر في الخليطة الملبدة .

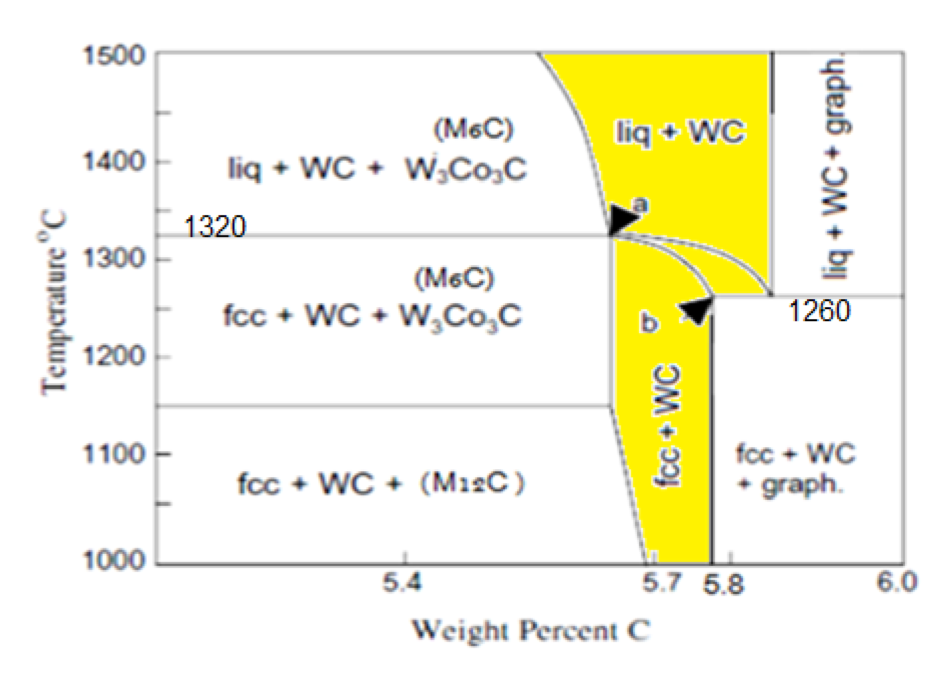


الشكل (٤٣)– مخطط توازن الأطوار (Co – WC) [9].

وعند ما نسبتة % 8 كوبالت (وهو تركيب المزيج المسحوقي موضوع البحث)، نلاحظ أن المحلول الصلب β المتين هو السائد بجانب كربيد التنغستن حتى الدرجة 1240°C، وفوق هذه الدرجة، يبدأ تشكل الطور السائل من المحلول الصلب β إلى جانب الكربيد. وفي المجال الحراري (1280 −1450)°C، يمكن أن يتشكل الطور η (M_6C) الهش، ويتعلق ذلك بمحتوى الكربون المتواجد. ومع استمرار التسخين، تزداد كمية السائل وصولاً الى الدرجة 1450°C حيث ينحل الطور η في الكوبالت ولا يظهر سوى طور كربيد التنغستن WC والطور السائل. وخلال مدة من الزمن عند تلك الدرجة ينتشر مصهور الكوبالت ليملأ المسام ما بين حبيبات الكربيد ويعيد رصّها رافعاً الكثافة نحو مستوياتها العظمى [9].

ومن أجل توضيح أثر نسبة الكربون الحر المتواجدة في الخليط على الأطوار المتشكلة، يبين الشكل (٤٤) مقطعاً لمخطط توازن الأطوار بدلالة محتوى الكربون الحر المتواجد وعند مجال حرج من تركيب الخليطة ومن أجل نسبة كوبالت ثابتة 6% حيث تمثل النقطتان (a ، b) على التوالي نسبة الكربون الحر الدنيا والعظمى اللتان تحددان في الخليطة المجال الذي يتشكل فيه فقط

طور ثنائي من(الكوبالت fcc + الكربيد WC) على منحني توازن الأطوار والذي يعدُّ المجال المفضل [9].



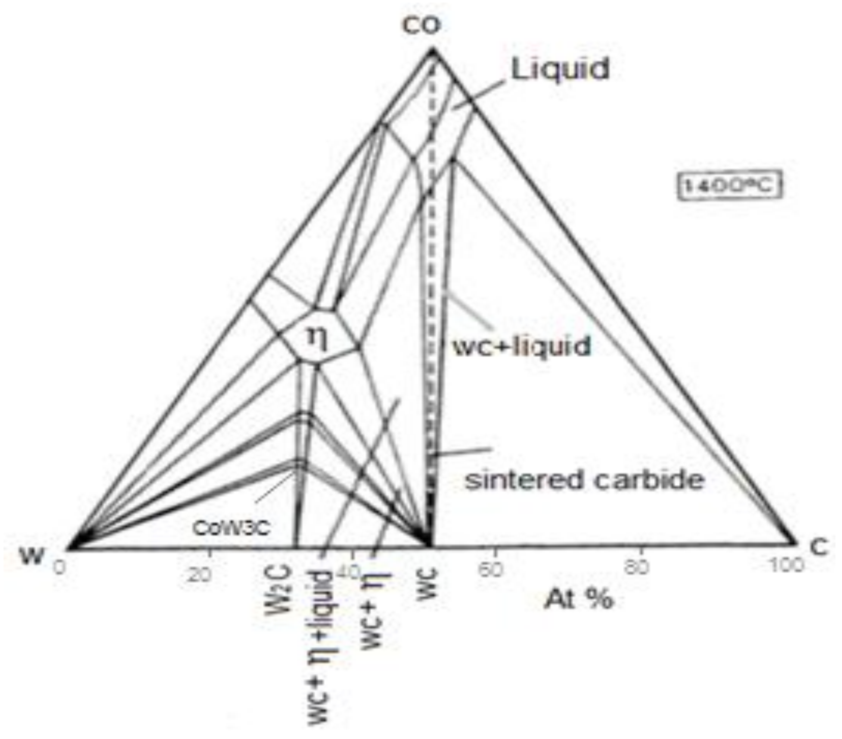
الشكل (٤٤) مقطع عمودي من مخطط الأطوار للجملة W–Co–C عند نسبة 6% Co [15].

يبين المخطط أن هناك نوعين من الأطوار يمكن أن يتشكل الطور $M_{12}C$ عالي الثباتية والطور M_6C (Co_3W_3C) الذي يتباين في التركيب بين $Co_{3.2}W_{2.8}C$ و Co_2W_4C.

في البداية يكون الكربيد M_6C من الطور η في حالة توازن مع الطور السائل ويمكن أن يتشكل وينمو أثناء عملية التبريد مما يسبب هشاشية في البنية نتيجة فقدان المعدن الرابط Co(fcc) وظهور طور هش M_6C مما يقلل فعالية كربيد التنغستن في تقوية متانة الخليطة الكربيدية.

ويتم تشكل النوع $M_{12}C$ في الحالة الصلبة (خلال التبريد) على هيئة حبيبات صغيرة موزعة في جميع أنحاء المعدن الأساس وهذا يساهم بشكل فعال في الحد من الهشاشية.

يوضح الشكل (٤٥) مقطع ثابت درجة الحرارة لمخطط الأطوار (كربيد التنغستن-كوبالت) عند الدرجة 1400°C الذي يبين التوازنات الطورية الحاصلة ضمن مناطق تلبيد المركب WC–Co . [14]



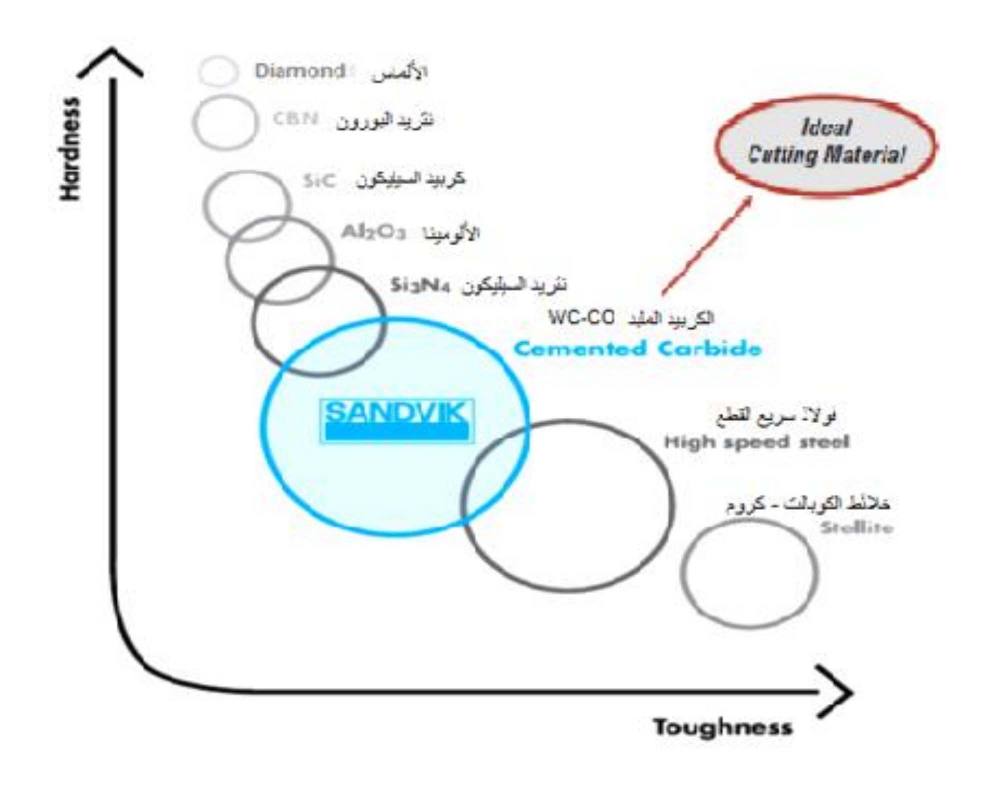
الشكل (٤٥)- مخطط الأطوار الثلاثي للجملة Co- W–C (مقطع ايزوترمي عند 1400 °C) [9].

١-١٦-٥ أهمية خلائط WC – Co.

حسب معظم الاحصاءات والدراسات، يذهب اجمالي ما نسبته 70% من انتاج خلائط كربيد التنغستن والكوبالت إلى صناعة لقم وأدوات القطع، أما الباقي، مانسبته 30% ، فهو يذهب إلى صناعة الأجزاء والمكونات المقاومة للاهتراء.

يبين الشكل التخطيطي رقم (٤٦) أكثر المواد الهندسية المستخدمة شيوعاً ومواقعها على مخطط القساوة والمتانة، وتحتل مجموعة الكربيدات الملبدة مكانة استراتيجية وسطية بسبب جمعها الفريد بين خواص القساوة العالية والمتانة الجيدة ضمن مجال واسع. وطبقاً لذلك، تتمتع هذه المجموعة، بين أخواتها من مجموعات المواد القاسية المختلفة، بتنوع كبير في تطبيقات العدد الهندسية و الأدوات.

تأتي أهمية هذه الخلائط من خصائصها الفريدة التي توافق العديد من التطبيقات الصناعية وغير الصناعية (كالمجوهرات) والعديد من المتطلبات الهندسية التي تحتاج إلى مقاومة اهتراء عالية مثل أدوات قطع وتشغيل المعادن الحديدية كالحديد الصب والمعادن اللاحديدية وأدوات تشكيل المعادن على البارد وعلى الساخن كالدرافيل والصناعات التعدينية التي تتضمن وجود إجهادات عالية وصدمات حرارية مثل قوالب سحب الأسلاك والقضبان والصفائح على البارد وعلى الساخن وقوالب التشكيل والبلص العميق والصك وفوهات التذرية والسفع.



الشكل (٤٦)– ترتيب أهم المواد الهندسية المستخدمة بدلالة خواص المتانة والقساوة [17].

كما تستخدم القمصان والبطانات والولائج المصنعة من الكربيد بشكل واسع ضمن القوالب واسطوانات المحركات الداخلية بفضل قساوتها ومقاومتها الفائقة للاهتراء وثباتية أبعادها عند عملها في درجات حرارة عالية. ويتم زرعها وتبديلها بطرائق ميكانيكية أو حرارية أو الإثنان معاً (shrink fitting) وخصوصاً في ولائج قوالب كبس وتدميج المساحيق الكربيدية والسيراميكية ذات الانتاجية العالية التي تحوي 10% –6 كوبالت.

تستخدم هذه الخلائط أيضاً في مكونات وأجزاء الآلات والمعدات كالمحامل والرولمانات والمكونات الهيدروليكية ومضخات الوقود في المحركات النفاثة وشفرات القص وكرات الطحن ونسلات المناشير وريش الثقب وسكاكين التفريز الدائرية التي تتفوق على مثيلاتها الفولاذية (HSS) والتي يمكن سن وجلخ الحدود القاطعة فيها لعدة مرات وبالأداء نفسه ودون تشوه مما يطيل عمرها.
ولعل أهم تطبيق لخلائط كربيد التنغستن والكوبالت هو اللقم الكربيدية المتنوعة التي تفوقت على أدوات القطع المصنعة من فولاذ سريع القطع (HSS) وذلك بفضل كفاءتها العالية في القطع المترافق مع تغير في معدل ارتفاع الحرارة حيث تتطلب شروط العمل تحمل الحرارة العالية والصدمات الحرارية والتعب والاهتراء والتآكل بالحك والتآكل الكيميائي وتحمل الاهتزازات الناجمة

عن عمليات التشغيل والقطع المتقطعة.

نظراً للقساوة العالية للكربيد، تصبح الأدوات الكربيدية المتوسطة الحجم ذات حساسية نحو التكسر، من جهة أخرى، يستدعي ارتفاع كلفة المساحيق الكربيدية تجاوز هذه المسألة باللجوء إلى تصنيع لقم كربيدية عالية الجودة صغيرة الحجم تتميز بشكل متناظر وانسيابي ويمكن تثبيتها بطريقة ميكانيكية أو بواسطة اللحام (Brazing) على حوامل معدنية يصنَّع ساقها عادة من مواد أقل قساوة كالفولاذ الكربوني. وبذلك، يتم الاستغناء عن تصنيع كامل أداة القطع من مادة الكربيد والاستفادة من حواف القَطعْ الكربيدية الحادة.



الشكل (٤٧)- لقم كربيدية مختلفة الشكل والنوع [8].

تتميز أدوات القَطعْ المصنعة من كربيد التنغستن الملبد (cemented carbide) بمقاومة سحل عالية وبالمحافظة على خواصها عند درجات حرارة أعلى مقارنة مع الأدوات التقليدية المصنعة من فولاذ سريع القطع (HSS).

وغالباً ما تستخدم حواف سطوح القطع الحادة لهذه الكربيدات في تشغيل الفولاذ الكربوني والفولاذ المقاوم للصدأ وفي حالات العمليات الانتاجية الكمية التي لا تتحملها الأنواع الأخرى من أدوات القَطعْ، ويعود ذلك إلى أن الأدوات الكربيدية تحافظ على حواف القَطعْ الحادة بشكل أفضل من الأدوات الأخرى. من جهة أخرى، تسمح هذه اللقم بتحقيق إنهاءات عالية لسطوح وأبعاد القِطع المشغلة كما تسمح مقاومتها للحرارة العالية بزيادة معدلات سرعة القطع.

يمكن ترتيب فئات مواد أدوات قطع وتشغيل المعادن وفق مقاومتها للاهتراء حسب التالي:

١- الفولاذ المقسى،

٢- خلائط الكوبالت-كروم- تنغستن Stellite،

٣- فولاذ سريع القطع HSS،

٤- كربيد التنغستن والكوبالت،

٥- خلائط السرمت والسيراميك،

٦- نتريد البور cBN (Cubic boron nitride) ،

٧- الألماس.

ويبين جدول المقارنة رقم (١٠) أزمنة عملية القطع اللازمة لتشغيل الفولاذ الكربوني باستخدام مواد أدوات قطع مختلفة.

جدول رقم (١٠)- مقارنة أزمنة القطع اللازمة لتشغيل الفولاذ باستخدام مواد أدوات قطع مختلفة [16].

مادة القطع	HSS	Cemented Carbide	Cermet & Ceramic	Diamond
زمن تشغيل الفولاذ	٥٠ دقيقة	١٥ دقيقة	٥ دقائق	١ دقيقة

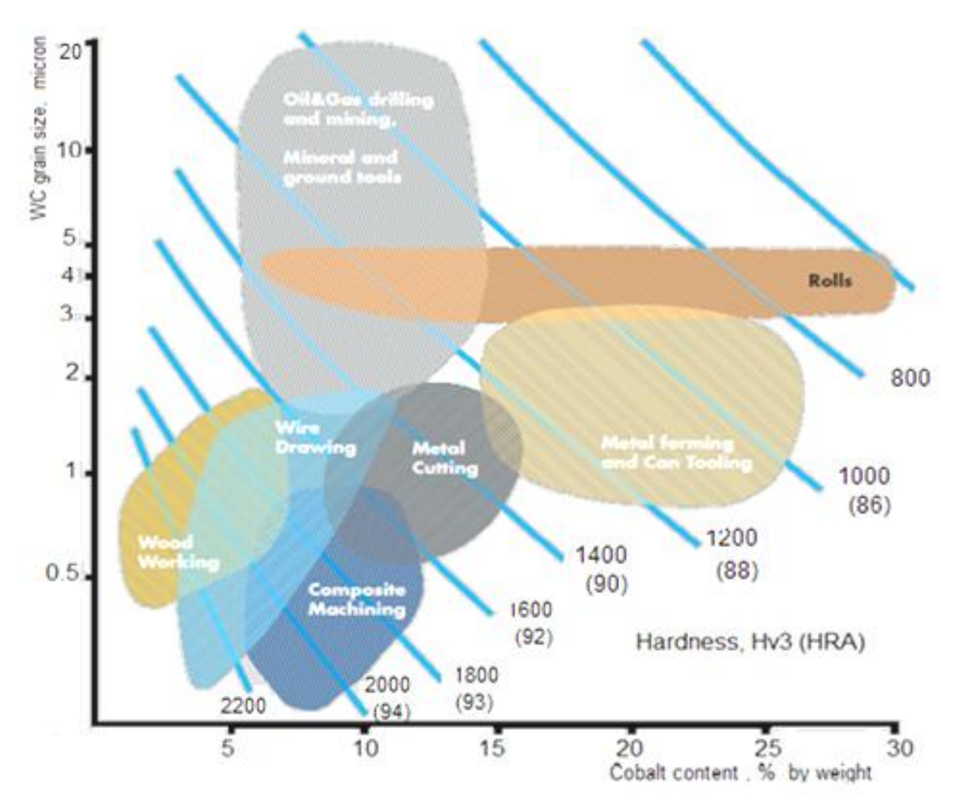
إلا أن تشغيل وإنهاء الأدوات والقطع الكربيدية بأشكالها وأبعادها النهائية بعد التلبيد لا يمكن انجازه إلا بعمليات الجلخ بأدوات من الألماس أو عمليات التشغيل بالحت الكهربائي (القص بالسلك والحت بالشرارة) ، وهي عملية مكلفة.

هناك عاملان يلعبان دوراً حاسماً في الخواص النهائية وفي اختيار التطبيق المناسب لخلائط كربيد التنغستن والكوبالت الملبد وهما:

١- نعومة حبيبات كربيد التنغستن: فمع ازدياد نعومتها تزداد مقاومة الاهتراء والقساوة.

٢- نسبة محتوى الكوبالت إلى الكربيد: يؤدي ازدياد نسبة محتوى الكوبالت الى انخفاض القساوة وازدياد متانة التحطم.

يبين الشكل (٤٨) مجال تطبيقات خلائط WC-Co, واستخداماتها كتابع للقساوة ونسبة محتوى الكوبالت في الخليطة وحجم حبيبات كربيد التنغستن الداخلة فيها [16].



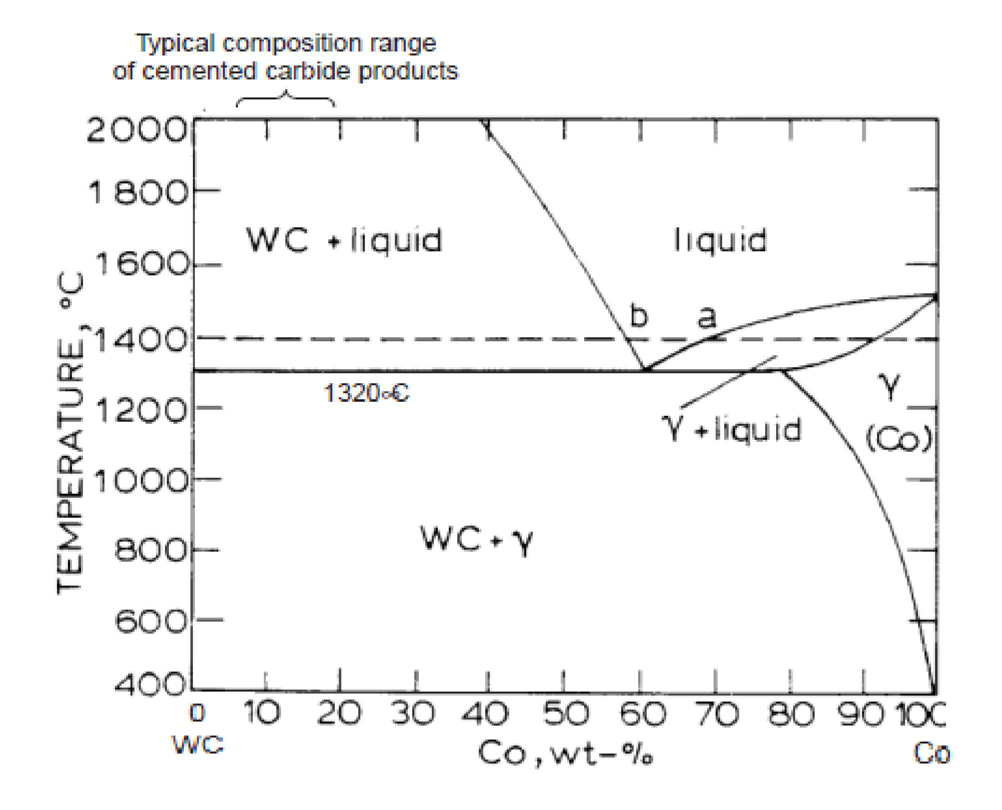
الشكل(٤٨)- مجال تطبيقات الخليطة WC–Co بدلالة القساوة ومحتوى الكوبالت ونعومة الحبيبات [17].

١-١٦-٦ أبرز المنشورات المتوافرة عالمياً حول تعدين مساحيق WC – Co.

تركزت أهم المعلومات المنشورة فيما يخص الخليطة WC – 8 wt % Co حول أثر متغيرات عملية التلبيد وبالأخص درجة حرارة التلبيد على خواص وتركيب الأطوار المتشكلة لهذه الخليطة ضمن مجموعة الكربيدات الملبدة cemented carbide .

في عام 2006، نشر الباحثان A.s.Kurlov و A.A. Rempel من أكاديمية العلوم الروسية – معهد فيزياء الحالة الصلبة بحثاً حول التعرف على الأطوار المتشكلة في هذه الخليطة في المجال الحراري للتلبيد ما بين 800– 1500 °C باستخدام انعراج الأشعة السينية والمجهر الالكتروني الماسح والمجهر الضوئي وقياس الكثافة والقساوة المجهرية.

بالنظر إلى مخطط الأطوار الثنائي البسيط للخليطة WC–Co (الشكل ٤٩)، نلاحظ وجود طورين فقط هما WC و γ (محلول كربيد التنغستن في الكوبالت) حيث يشكل WC مع الكوبالت يوتكتيك عند الدرجة 1320 °C . ويبدو أن الأمر أكثر تعقيداً حيث يسفر تواجد الكربون الحر و W_2C ضمن الخليطة، وهو أمر طبيعي، عن حدوث تفاعلات وأطوار أخرى [14].



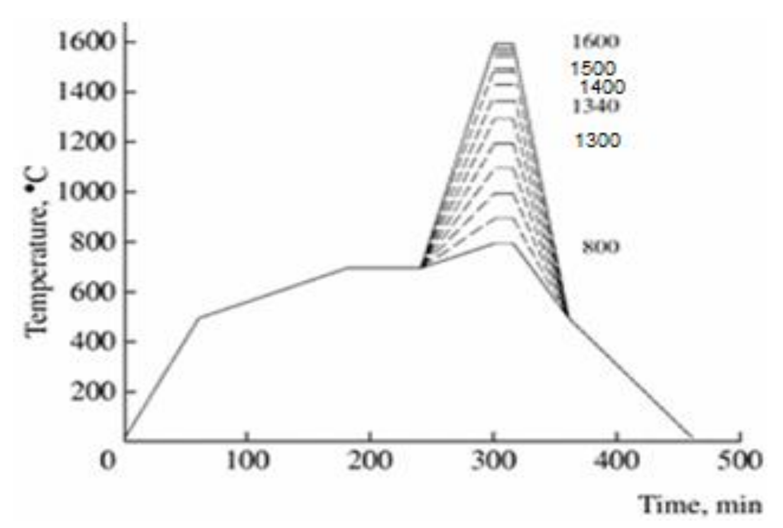
(الشكل٤٩) – مخطط الطور الثنائي للخليطة WC–Co [3] .

وفي الحقيقة، تجري خلال مراحل التلبيد في الطور السائل عمليات الانحلال الانتشاري للمحاليل الصلبة المتشكلة على مستوى الجمل الثلاثة المتواجدة فعلياً في مزيج المساحيق وهي :

جملة (WC – Co) ، جملة (W – Co – C) وجملة (W – C).

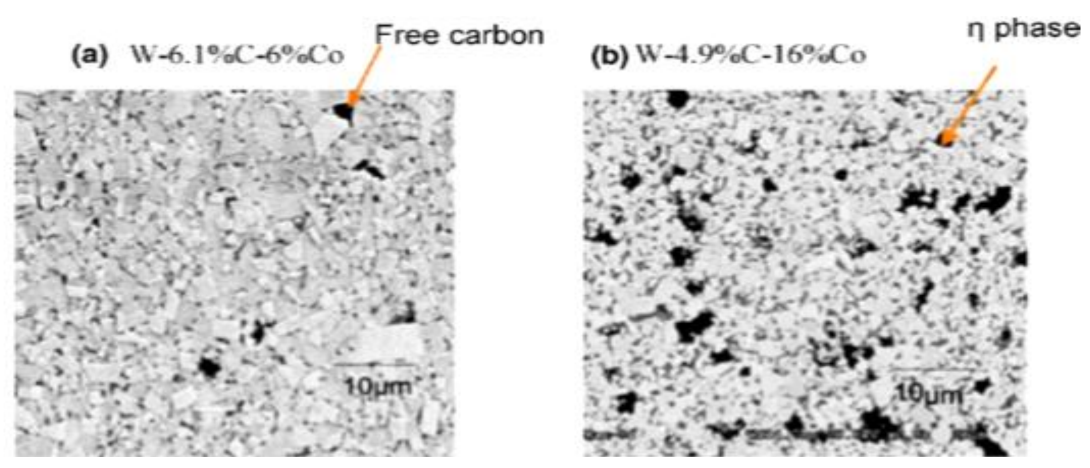
أظهرت النتائج أنه خلال تلبيد مزيج المسحوق الأولي (الحاوي على W_2C والكربون الحر إضافة إلى WC–Co وهذا أمر طبيعي)، يتفاعل W_2C مع معدن الكوبالت ليشكل المركب Co_3W. وعند بلوغ المجال 900– 1200 °C، يتشكل طور الكربيد الثلاثي η (Co_6W_6C). ومع ازدياد الحرارة عند 1300 °C، يتفاعل هذا الطور مع الكربون ليشكل المركب (Co_3W_3C)، الشكل الآخر للطور η ، ويترافق التلبيد في المجال فوق 1000 °C مع تشكل الطور β وهو محلول صلب ذو بنية مكعبة الشكل لكربيد التنغستن في الكوبالت (WC) CO. تم قياس الكثافة والقساوة المجهرية للعينات الملبدة كتابع لدرجة حرارة التلبيد وتم طبقاً لذلك تحديد درجة حرارة التلبيد المثلى.

يبين الشكل (٥٠) مخطط التلبيد لهذه الخليطة عند درجات حرارة مختلفة [18].

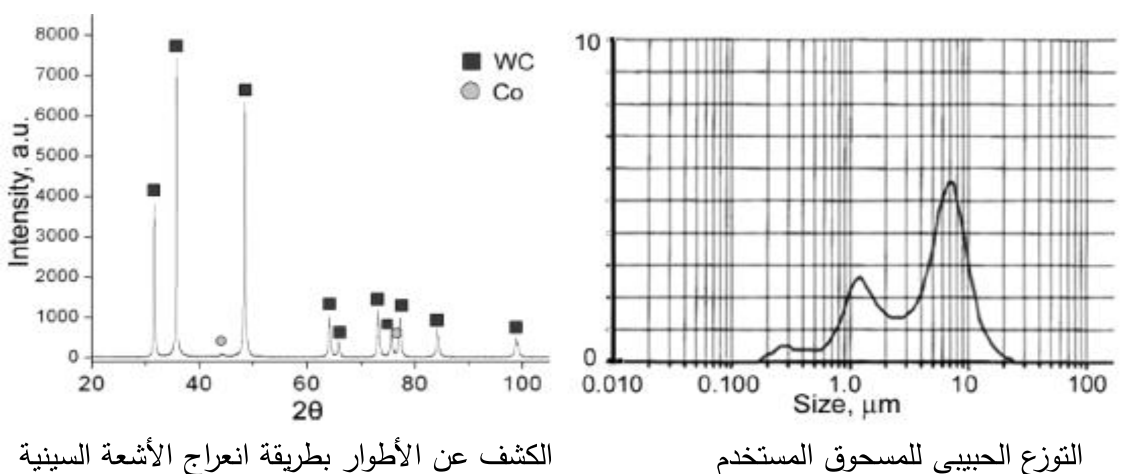


الشكل(٥٠)– برنامج تلبيد الخليطة WC–8 wt % Co عند درجات حرارة مختلفة [18].

يبين الشكل (٥١–١) بنية الأطوار المتشكلة بعد التلبيد ويظهر الكربون الحر والطور η الهش.



الشكل (٥١–١)– بنية الأطوار المتشكلة بعد التلبيد. يظهر الكربون الحر والطور η الهش [19].

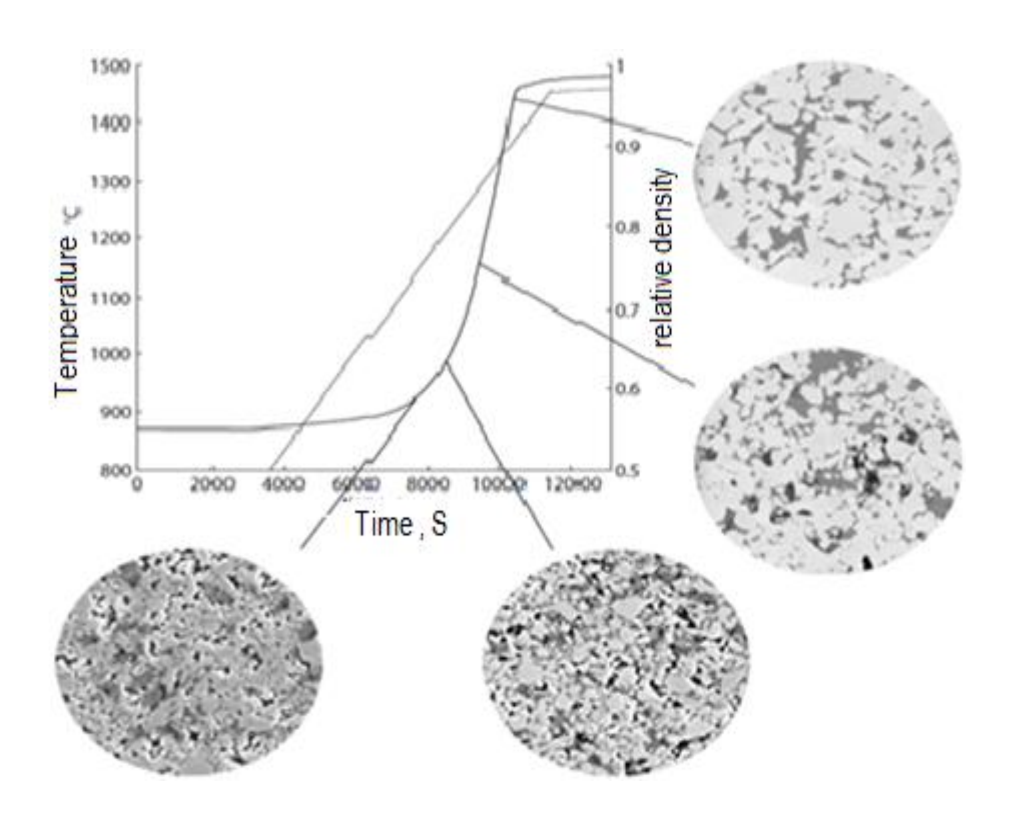


الكشف عن الأطوار بطريقة انعراج الأشعة السينية للخليطة WC – 8 wt % Co.

التوزع الحبيبي للمسحوق المستخدم

الشكل (٥١–٢) [20].

يبين الشكل (٣-٥١) – التحولات البنيوية المترافقة خلال عملية التكثيف [21].
حيث يلاحظ انغلاق المسامات وزوالها تدريجياً مع تقدم مراحل عملية التلبيد وانصهار الكوبالت وملئه للمسامات.



الشكل (٣-٥١)– التحولات البنيوية خلال عملية التكثيف [21].

٢- الفصل الثانـي

المواد والطرائق.

٢-١ المواد.

- مسحوق كربيد التنغستن WC: ذو لون رمادي مسودّ ؛ بنية سداسية Hexagonal ؛ الكثافة: $15.63\ gcm^{-3}$ ؛ القساوة 2200 Hv ؛ درجة حرارة الانصهار : 2800 °C.
- مسحوق الكوبالت Co: كوري المنشأ؛ رمادي اللون؛ بنية مكعبة؛ الكثافة: $8.9\ gcm^{-3}$ ؛ القساوة: دون 100 Hv ؛ درجة حرارة الانصهار : 1493 °C.
- بولي فينيل أسيتات PVAc: من السوق المحلية ؛ بيضاء اللون (مادة رابطة).
- بولي ايتيلين غليكول (PEG): من السوق المحلية ؛ شفاف (مذيب عضوي).
- ستيارات الزنك: مسحوق أبيض اللون من السوق المحلية (مادة مزلقة).
- مسحوق المغنيزيا: MgO أبيض مائل للاصفرار؛ مسحوق خامل.

٢- ٢ الأدوات.

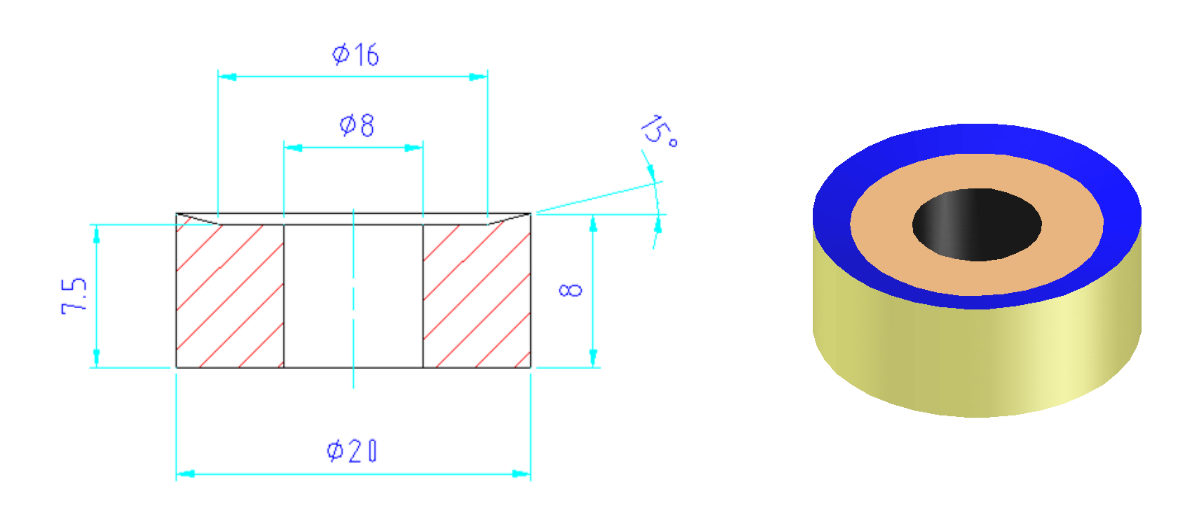
- وعاء معدني من الستانلس للتجفيف،
- دورق زجاجي،
- صحون بلاستيكية مختلفة الحجم،
- ملوق معدني للخلط اليدوي،
- ملاعق معدنية صغيرة،
- منخل خشن فتحة 0.35 mm،
- حاوية مع غطاء من مادة الغرافيت (للتلبيد)،
- اسطوانات غاز آزوت – آرغون (للتقسية والتلبيد)،
- القوالب المعدنية.

تم استخدام ثلاث قوالب معدنية لكبس اللقم الكربيدية وعينات اختبار التحطم وتشكيلها.

القالب الأول.

تم تصميم وتصنيع القالب الأول بهدف كبس وتشكيل منتج من عينات أولية دائرية مشابهة للقمة الكربيدية من حيث الشكل والحجم ومن ثم تلبيدها وقياس قيم الكثافة والقساوة والأبعاد النهائية وذلك من أجل معرفة وتحديد قيم البارامترات المثلى لضغوط الكبس اللازمة وحساب الانكماشات الحجمية والوزنية للخليطة المسحوقية المستخدمة (WC – 8 % Co) ومراعاة ذلك لدى تصميم القالب النهائي للقمة المعيارية .

يبين الشكل رقم (٥٢) مخطط هندسي للعينات الأولية المنتجة بواسطة القالب الأول.

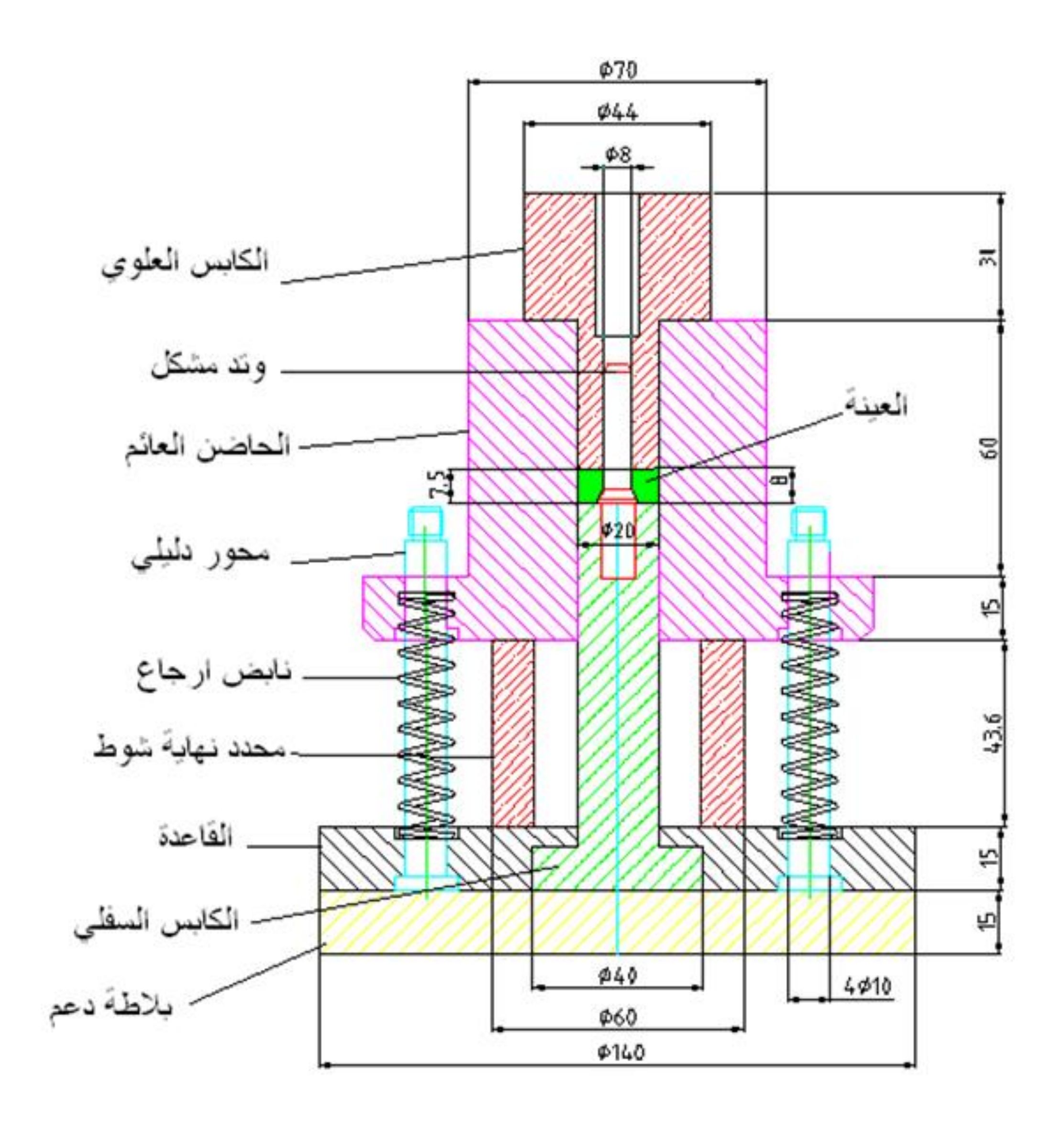


الشكل (٥٢)– المخطط الهندسي لعينات اللقمة الكربيدية الأولية (حد قاطع وحيد)– الأبعاد بـ مم.

ويعتمد التصميم على طريقة القالب العائم وأسلوب الكبس من كلا الجهتين وذلك من أجل تحقيق أكبر تجانس ممكن في كثافة القطعة المضغوطة.

تم تصنيع أجزاء القالب الرئيسة، الحاضن ؛ الكابس العلوي ؛ الكابس السفلي ؛ وتد التشكيل الداخلي ؛ بلاطة القاعدة، من فولاذ العدة (Tool Steel) وتحديداً من مجموعة فولاذ العمل على البارد (**D_6** – Cold work Tool Steel) حسب المعيار الأمريكي ASTM . ويعدُّ هذا المعدن الأعلى مقاومة للاهتراء من بين المجموعة كلها أي (سلسلة D) نظراً لتركيبه واحتوائه على أعلى نسبة كربون (% 2.1) في المجموعة.

يبين الشكل رقم (٥٣) المخطط الهندسي التجميعي لأجزاء القالب الرئيسة ومسمياتها وأبعاد القالب.



الشكل (٥٣)- المخطط الهندسي التجميعي لأجزاء قالب عينات اللقمة الأولية ومسمياتها وأبعادها.

ويبين الجدول رقم (١١) المواصفات الفنية والتركيب الكيميائي لمعدن القالب D_6 وتطبيقاته حسب دليل الفولاذ KEY TO STEEL. راجع الملحق رقم (١).

1.2436

DIN : X 210CrW12

AISI : D6

جدول رقم (١١)- التركيب الكيميائي لمعدن القالب D_6.

CHEMICAL COMPOSITION %				
C	Si	Mn	Cr	W
2.10	0.35	0.35	12.0	0.70

ويبين الجدول رقم (١٢) معاملات المعالجة الحرارية لمعدن القالب (فولاذ D_6).

الجدول رقم (١٢)- معاملات المعالجة الحرارية لمعدن القالب (فولاذ D_6).

Heat Treatment	Temperature	Time	Cooling
Soft Annealing	800 – 840 °C	2 – 5 hours	Furnace
Stress Relieving	600 – 650 °C	2 hours	Furnace
Hardening	960 – 980 °C	20- 30 min	Oil , Air
Tempering	160 – 300 °C	2 hours at least	Air

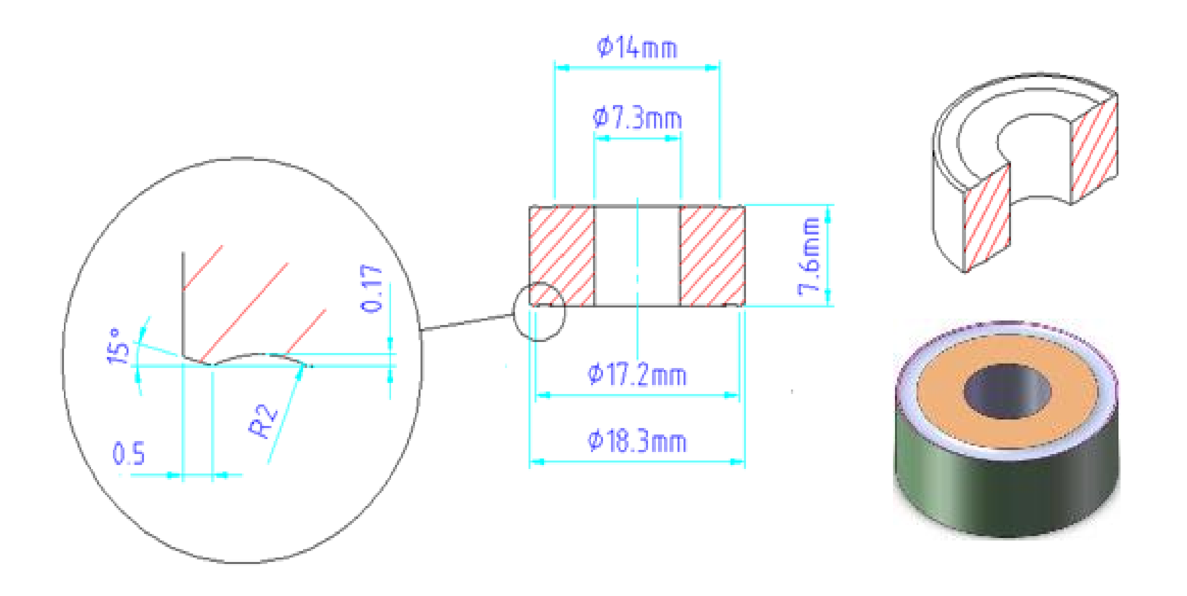
Tempering Temperature °C	100	200	300	400	500	600
HRC	63	62	60	58	56	48

من أجل رفع متانة تحمل أجزاء القالب تجاه ضغوط الكبس المطبقة عليه وتحسين مقاومة الاهتراء لجدرانه وسطوحه وإطالة عمر خدمته، فقد تم إجراء معالجة حرارية للقالب (تقسية + ارجاع) ضمن فرن التخلية للحصول على قساوة كلية مقدارها HRC 60-62 وذلك وفق الخطوات التالية:

١- تفريغ جو الفرن حتى 1×10^{-2} mbar (Prevacuum)،
٢- التسخين على مراحل بمعدل 5 °C /min حتى 980 °C (Austenizing)،
٣- التثبيت لمدة 0.5 ساعة عند 980 °C ،
٤- التبريد داخل الفرن (Quenching) بواسطة غاز N_2 عند الضغط (١٠ بار) وبمعدل تبريد 50 °C /min ،
٥- المراجعة (Tempering) وإعادة التسخين الى الدرجة 200 °C لمدة ساعتين مع تشغيل توربين التجانس ،
٦- التبريد داخل الفرن بواسطة غاز N_2 عند الضغط (٣ بار)،
٧- اجراء عملية التجليخ من أجل حصر الأبعاد النهائية والتسامحات والازواجات،
٨- قياس القساوة على جهاز روكول HRC 60-62.

القالب الثاني :

تم تصميم وتصنيع هذا القالب لكبس عينات من اللقمة النهائية التي تحمل الرمز RNMG حسب المعايير الدولية لشركة ساندفيك والموضحة بالمخطط الهندسي للشكل رقم (٥٤) وذلك بعد إدخال عامل تصحيح الإنكماش الخطي خلال التلبيد وقدره (15– 17%). وتتميز هذه اللقمة بحد قطع مزدوج (من كلا الوجهين).

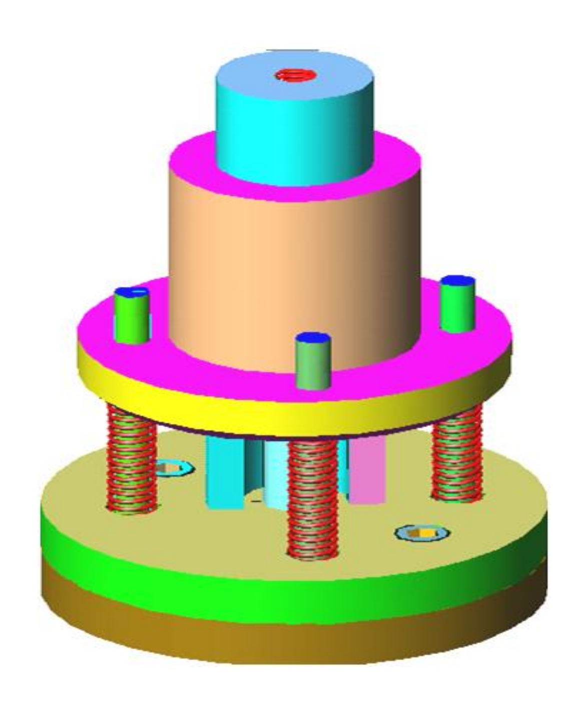


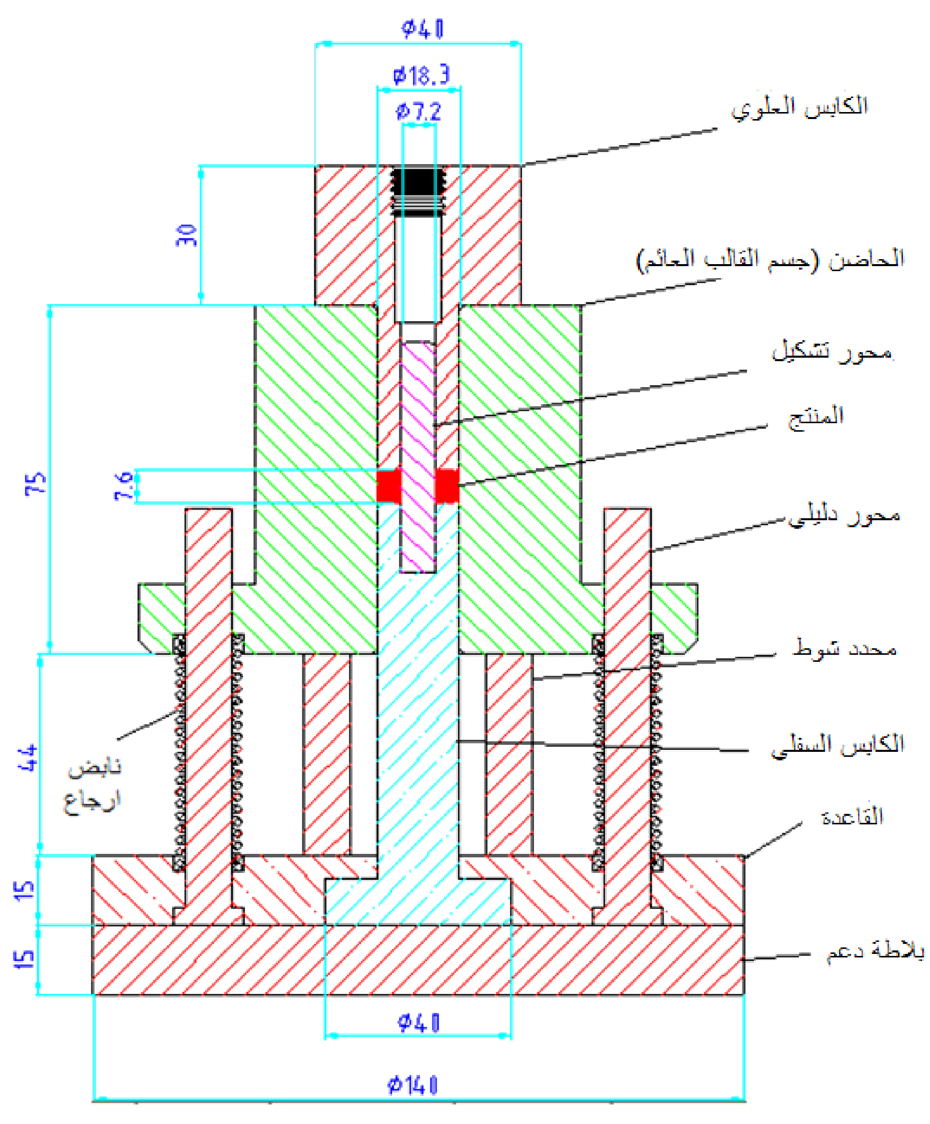
الشكل (٥٤)– المخطط الهندسي لعينات اللقمة النهائية المعيارية RNMG.

بعد معرفة وتحديد الإنكماش الخطي للخليطة وقدره (15 – 17 %)، تم أخذه بالحسبان عند تصميم القالب الثاني وذلك لتحقيق أبعاد اللقمة المطلوبة.

تم التصميم وفقاً لطريقة القالب العائم واستخدام أسلوب الكبس من الجهتين وذلك لتحقيق أكبر تجانس ممكن في كثافة القطعة المضغوطة وهو مشابه في تصميمه للقالب الأول ويتميز عنه بوجود تشكيلات الحدود القاطعة على سطحي كل من الكابس العلوي والسفلي. كما تم إجراء المعالجة الحرارية لمعدن أجزاء القالب على غرار ما تم على القالب الأول من المعدن D6.

يبين الشكل رقم (٥٥) المخطط الهندسي التجميعي لأجزاء القالب الثاني ومسمياتها وأبعاد القالب.



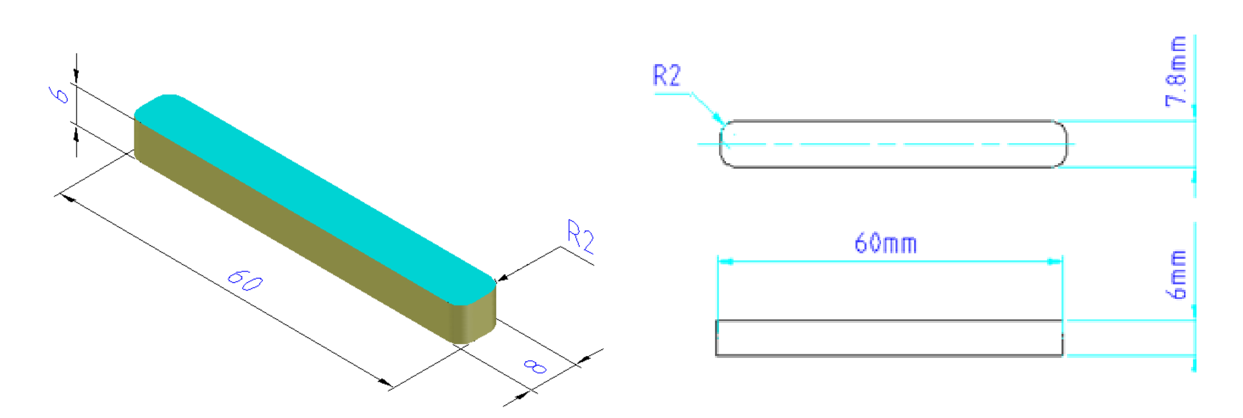


الشكل (٥٥)– المخطط الهندسي التجميعي لقالب عينات اللقمة النهائية RNMG ومسمياته وأبعاده.

القالب الثالث :

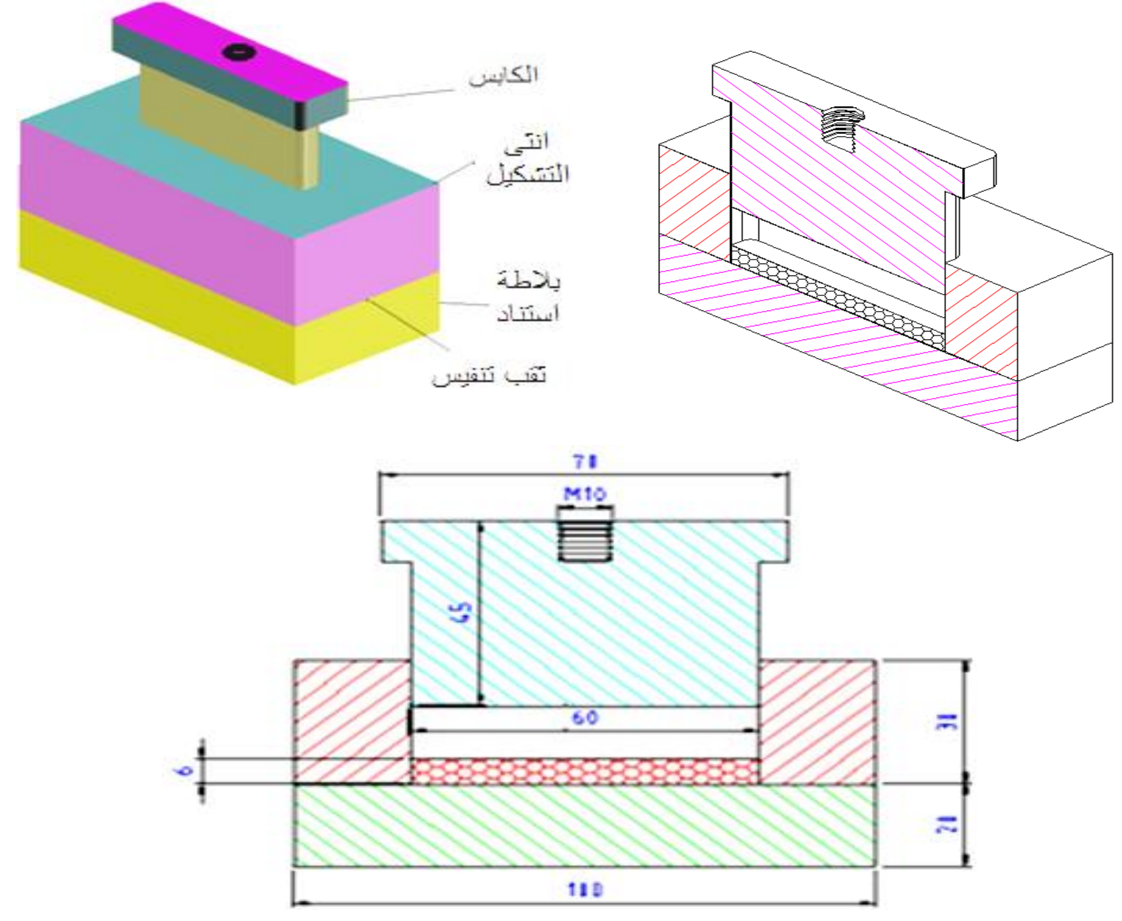
تم تصميم وتصنيع هذا القالب لكبس وإنتاج عدد من العينات الكربيدية المعيارية لاختبار متانة التحطم على جهاز اختبار الانعطاف ٣ نقاط وفق المواصفة ASTM–B406.

يبين الشكل رقم (٥٦) المخطط الهندسي لعينة اختبار التحطم المعيارية المشكلة في هذا القالب.



الشكل (٥٦)– المخطط الهندسي لعينة اختبار التحطم الكربيدية المعيارية.

ويبين الشكل (٥٧) المخطط الهندسي لأجزاء هذا القالب ومسمياتها.



الشكل (٥٧)– المخطط الهندسي لقالب عينات اختبار مقاومة الانعطاف (٣ نقاط) ومسمياته.

٢-٣ التجهيزات.

٢-٣-١ أجهزة تحضير العينات.

٢-٣-١-١ المكبس الهيدروليكي اليدوي طراز DAKE- 50T.

المكبس أمريكي الصنع مصمم من أجل مجال واسع لتطبيقات الكبس بأحمال من (50-1) طن. يتم تطبيق الحمل عن طريق تحريك ذراع تطبيق القوة بشكل يدوي وصولاً إلى الحمل المطلوب والمراقب على مؤشر مقياس الضغط الميكانيكي.

المواصفات الفنية:

- القوة العظمى المطبقة 50 طن،
- مجال تطبيق الحمل (50-1) طن،
- مزود بساعة قياس ميكانيكية ومؤشر قراءة القوة المطبقة بدقة 1 طن،
- قطر اسطوانة تطبيق الحمل (RAM) 85 mm،
- شوط حركة المكبس 20 cm،
- جهة تطبيق القوة من الأعلى،
- أبعاد الطاولة (20cm x 40cm)،
- الوزن 140 kg .

يبين الشكل رقم (٥٨) صورة المكبس مع أجزائه الرئيسة.

١- جسم المكبس (الهيكل)،
٢- مجموعة تطبيق الضغط وتتكون من: اسطوانة الضغط؛ ذراع التحريك؛ صمام تحرير الضغط؛ خزان الزيت ؛ مقياس الضغط الميكانيكي ،
٣- موضع القالب (طاولة الاستناد).



الشكل رقم (٥٨) المكبس DAKE– 50T مع أجزائه الرئيسية.

٢-٣-١-٢ المكبس الهيدروليكي الآلي طراز Enerpac –100 Ton .

المكبس تشيكي الصنع وهو مصمم من أجل مجال واسع من تطبيقات الكبس وبأحمال تتراوح من 1 وحتى 100 طن، ومزود بمجموعة ضغط هيدروليكية ذات محرك كهربائي ومجموعة من صمامات التحكم لضبط سرعة حركة المكبس صعوداً ونزولاً وكذلك معايرة قوة الضغط العظمى. يتم تطبيق الحمل وإزالته بواسطة أزرار التحكم حتى الوصول الى الحمل المطلوب وتتيح حركة المكبس العكسية نحو الأعلى إمكانية التحكم بعملية اللفظ وسهولتها بعد انتهاء الكبس.

المواصفات الفنية:

- القوة العظمى المطبقة 100 طن،
- مجال تطبيق الحمل (100 – 1) طن،
- مزود بمؤشر ميكانيكي لقياس قيم الضغط المطبق بدقة 1 بار مجال (200 – 1 بار)
- قطر اسطوانة تطبيق الحمل (RAM) 100 mm ،
- شوط حركة المكبس 25 cm،
- استطاعة المحرك الكهربائي 2.2 KW،
- جهة تطبيق القوة من الأعلى وبالاتجاهين (صعوداً ونزولاً)،
- أبعاد طاولة العمل (33cmx100 cm) مجهزة بدلائل ومثيتات لتثبيت القالب قابلة للحركة،
- الوزن الاجمالي 800 kg.

يبين الشكل رقم (٥٩) صورة المكبس:



الشكل رقم (٥٩)– المكبس الهيدروليكي Enerpac-100T.

٢-٣-١-٣ فرن المعالجة الحرارية الكتيم طراز HT 1600 M.

صنع شركة Linn High Therm وهو فرن مخصص لإجراء المعالجات الحرارية، ويمكنه الوصول إلى درجة حرارة عظمى 1600 °C باستطاعة كهربائية قدرها 6 kW. يعتمد الفرن في التسخين على 4 وشائع موزعة على جانبي الفرن ويتم التحكم بسير العمل بواسطة وحدة التحكم الموصولة مع الفرن والقابلة للبرمجة بمراحل متعددة (٢٥ مرحلة) حيث يمكن التحكم في كل مرحلة بالمعاملات التالية:

- سرعة التسخين (سرعة التسخين الأعظمية 25°C/min حتى 1000°C)،
- مدة ثبات درجة الحرارة،
- درجة حرارة التثبيت،
- سرعة التبريد (سرعة التبريد الأعظمية 5.7 °C/min من 1000 °C حتى 600 °C).

تعتمد عازلية الفرن على عدة طبقات من الألومينا تحيط بالفرن من الوجوه الستة كما يحتوي باب الفرن على مانعة سيليكونية وعين زجاجية لرؤية العينة داخل الفرن وتبرد بواسطة الماء.





الشكل (٦٠)- فرن مقاومة كهربائي كتيم HT1600M (1600 °C).

- يتم التسخين بواسطة ٤ عناصر تسخين معزولة مصنوعة من خليطة SuperKanthal على شكل حرف U من مادة $MOSi_2$ وموزعة بشكل متناظر على الجدران الجانبية للحجرة. وفي حالات الاستخدام الطويل ضمن جو مؤكسد، لا ينصح بأكثر من 1550 °C.
- أبعاد حجرة الفرن المفيدة 250 x 200 x 250 mm معزولة بألواح من الألومينا .
- يتضمن الفرن دارة تبريد بالماء وصمامات دخول وخروج تسمح بضخ الغازات الواقية بالتدفق المطلوب بشكل مستمر أو لمرة واحدة ضمن الحجرة ، ويمتاز الفرن بكتامته العالية.
- وزن الفرن مع وحدة التحكم بحدود 160 kg.

٢-٣-١-٤ **فرن الخلاء** (Fulgura 1350 °C ECM (High Vacuum.

صنع شركة ECM الفرنسية وهو فريد من نوعه، صُمم بشكل اسطواني أفقي التوضع لإجراء المعالجات الحرارية التالية بشكل مؤتمت كلياً:

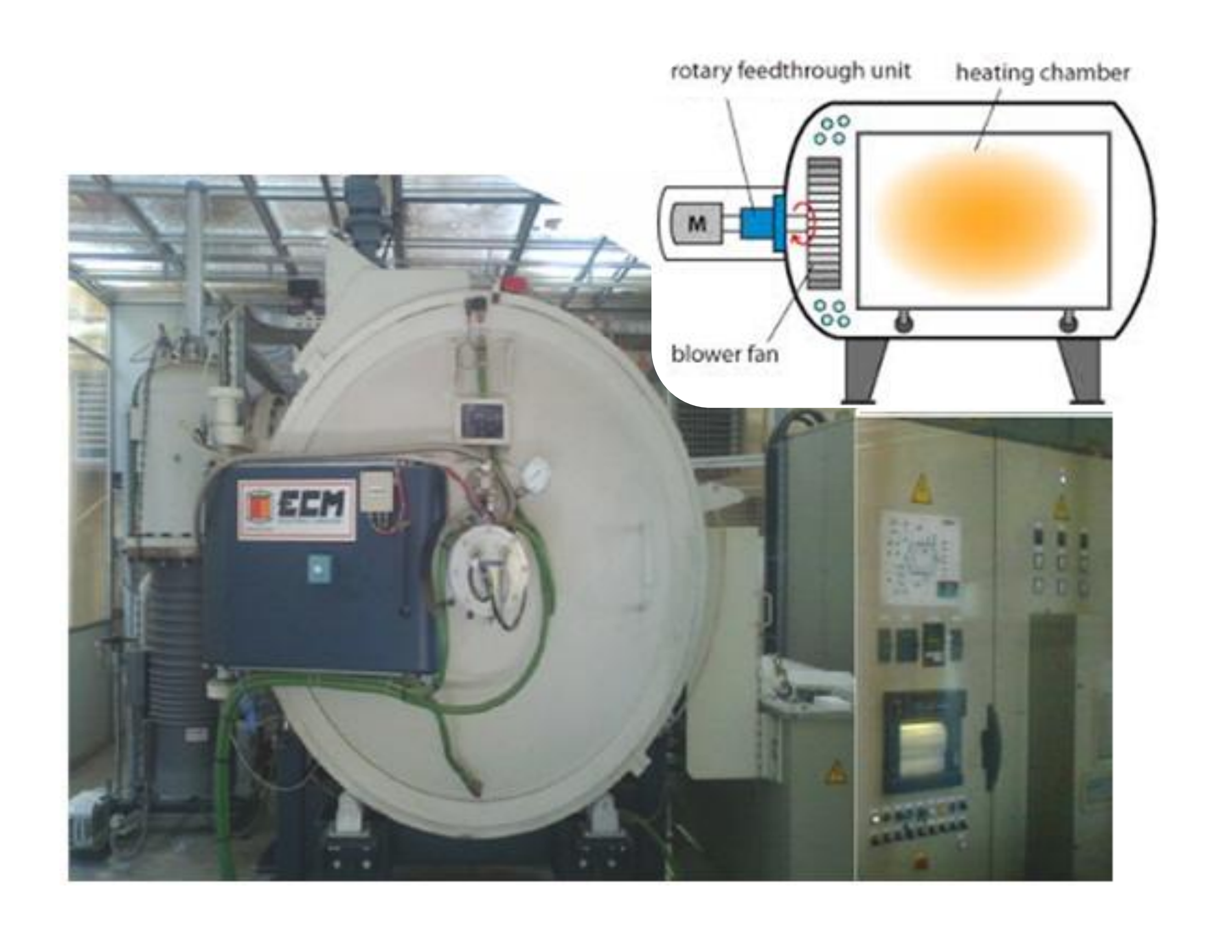
(Brazing – Ageing – Sintering – Tempering – Hardening).

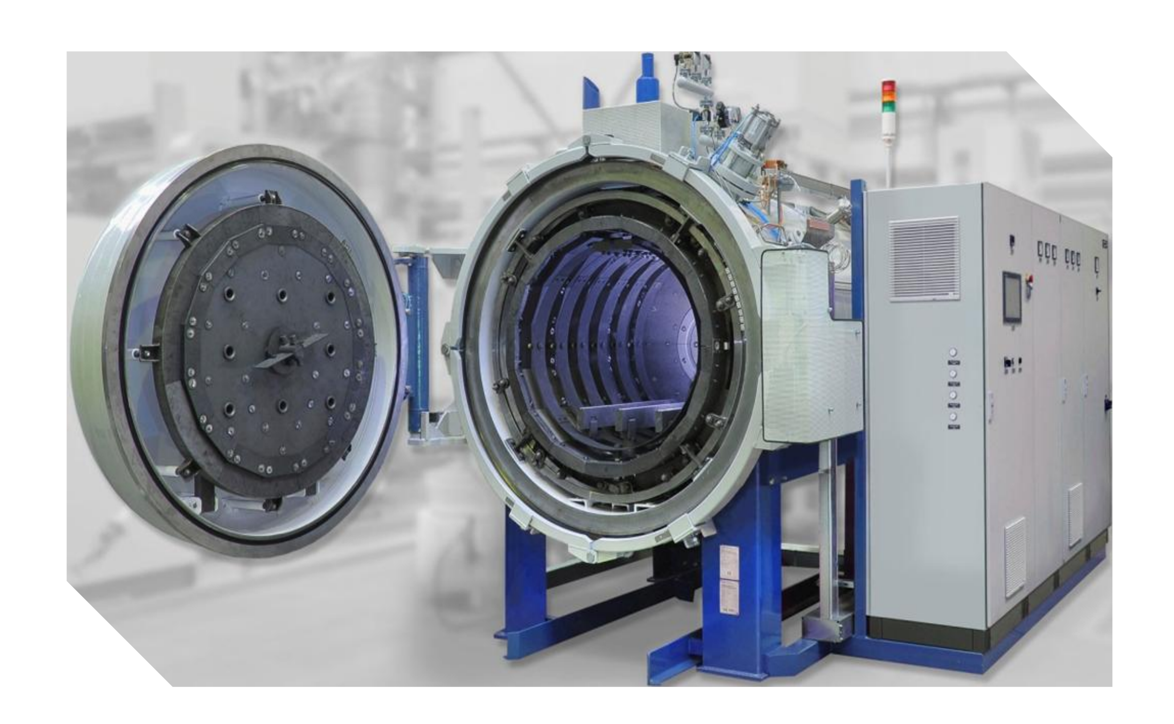
يتم إدخال وإخراج المواد قيد المعالجة على البارد، ويمكن إجراء عمليات التسخين والتثبيت والتبريد تحت أجواء مختلفة (خلاء عميق – غاز واق – ضغوط جزئية منخفضة). ويتمتع الفرن بمرونة عالية من حيث معدل سرعة التسخين والتبريد والتجانس الحراري ، أما مواصفاته الفنية فهي:

- درجة الحرارة العظمى 1350 °C،
- معدل سرعة التسخين : 1 – 20 ºC /min،
- معدل سرعة التبريد : 0.5 – 55 ºC /min،
- التجانس الحراري : ± 1 °C،
- السخانات شرائح مرنة من مادة (CFC (Carbon fiber Composite،
- العزل الداخلي من ألواح مرنة من ألياف الغرافيت،
- طاولة الاستناد والمثبتات من الألومينا والغرافيت والمولبدينيوم،
- مجال التخلية الأعظمي $5X\ 10^{-6}$ mbar باستخدام (Diffusion pump)،
- ضغط الاسقاء (التبريد) الأعظمي 10 bar،
- عمليات التسخين والأجواء والضغوط متحكم بها بواسطة PLC ،
- يمكن التسخين أو التبريد ضمن غاز النتروجين أو الآرغون كأجواء واقية ،
- مزود بتوربين تجانس من الغرافيت،
- مزود بتوربين من أجل عمليات التبريد السريع 135 KW،
- استطاعة مسخنات الفرن 100 kw.

وتغذي دارات الفرن المختلفة شبكة خطوط امداد بغاز النتروجين ومياه التبريد والهواء المضغوط اللازمة لعمل الفرن.

يبين الشكل (٦١) فرن التخلية ECM طراز Fulgura 1350 °C.





الشكل رقم (٦١)– فرن التخلية ECM °C 1350 Fulgura.

٢-٣-١-٥ الميزان الإلكتروني الدقيق طراز Shixko Denshi 0.01g.

وهو ميزان الكتروني دقيق ياباني الصنع يقيس الأوزان بدقة 0.01 g ، أما مجال قياس الأوزان من (0– 3 kg) مع إمكانية إجراء معايرة ذاتية وتصفير في أي وقت. يعطي الشكل (٦٢) صورة لهذا للميزان.



الشكل رقم (٦٢)– الميزان الالكتروني طراز Shixko Denshi 0.01g.

٢-٣-٢ أجهزة الاختبار والقياس.

٢-٣-٢-١**المنخل التحليلي الهزاز** Vibratory Sieve Shaker طراز AS200 Control g.

صنع شركة Retsch، طراز AS 200، يستخدم هذا الجهاز بشكلٍ أساس لتحديد التوزع الحبيبي حيث توضع عينة بوزن محدد على المنخل العلوي من المجموعة المؤلفة من سلسلة نظامية من المناخل المتدرجة في صغر فتحاتها من الأعلى إلى الأسفل، وبعد إغلاق فتحة المنخل العلوي نقوم بتشغيل محرك هز المناخل مما يؤدي إلى فرز حبيبات المسحوق فوق المناخل حسب أقطارها. نقوم بعد ذلك بحساب النسبة المئوية لكمية المسحوق المتبقية فوق كل من المناخل والمارة تحت المنخل الأخير وبذلك نكون قد حددنا التوزع الحبيبي المطلوب.
يمكن القيام بعملية التنخيل بشكل رطب أو جاف بحيث لا يتجاوز وزن العينة المختبرة 3kg.
المواصفات الفنية:

- مجال قياس الجهاز 20µm – 2.5 mm،
- مطال الاهتزاز 3 –0.2 mm،
- فتحات المناخل المتوفرة:

20; 45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 2000 µm

- زمن العمل المبرمج: 1- 99 min،
- الارتفاع الأعظمي للمناخل 450 mm،
- الجهد 100- 240 V – أحادي الطور،
- الأبعاد الخارجية 400 x 230 x 350 mm،
- الوزن الصافي 30 kg.

يوضح الشكل رقم (٦٣) صورة مجموعة المناخل الهزازة.



الشكل رقم (٦٣)- مجموعة المناخل التحليلية الهزازة.

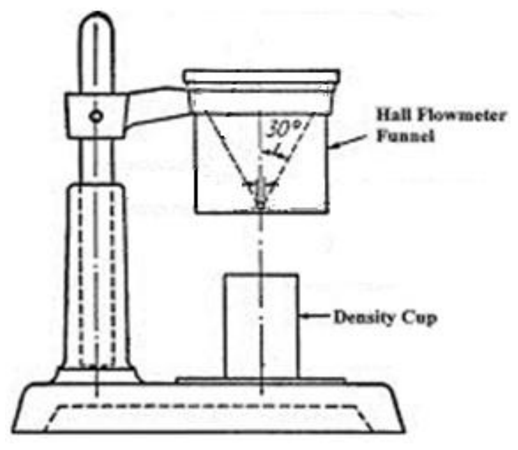
٢-٣-٢-٢ جهاز قياس معدل الانسيابية (تصنيع محلي).

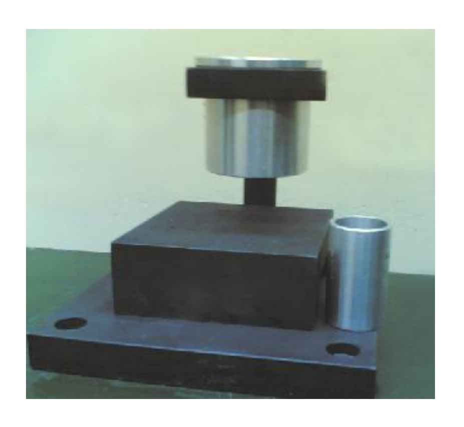
عبارة عن جهاز يقيس معدل انسياب المسحوق والكثافة الظاهرية وهو مصنع محلياً.

المواصفات الفنية:

- قطر الفتحة السفلية: 2.5 mm،
- زاوية الرأس ° 60.

يوضح الشكل رقم (٦٤) جهاز اختبار الانسيابية.





الشكل رقم (٦٤)- جهاز اختبار الانسيابية.

٢-٣-٢-٣ آلة صقل العينات leco طراز VP – 160 .

صنع شركة leco الأمريكية ، طراز VP-160 ، صالحة لجلخ وصقل العينات المعدنية وغير المعدنية، وهي أفقية التوضع تتألف من قرص جلخ قابل للدوران بمحرك ذي استطاعة 1Kw وسرعة دوران متغيرة قابلة للتعديل. يبلغ قطر قرص الجلخ الدوار 30 cm وهو قابل للتبريد بالماء آلياً ومزود بصمام يمكّننا من التحكم بالغزارة أيضاً.

المواصفات الفنية:

- سرعة الدوران من rpm (25 – 600)،
- الأبعاد الخارجية 800 x 650 x 30 mm،
- الوزن 95 kg،
- 10 A – 50-60 Hz – 220 V،
- مزود بوحدة تبريد بالماء ذات ضغط متغير من 1-6 بار،
- قطر قرص الجلخ 25 cm،
- مزودة بوحدة تنظيف بالماء النفاث للبرادة الناجمة عن التجليخ.

يوضح الشكل رقم (٦٥) صورة آلة الصقل المستخدمة.



الشكل (٦٥)- آلة الصقل LECO – VP160.

٢-٣-٢-٤ مجهر فحص البنية الضوئي Olympus طراز BX 60M .

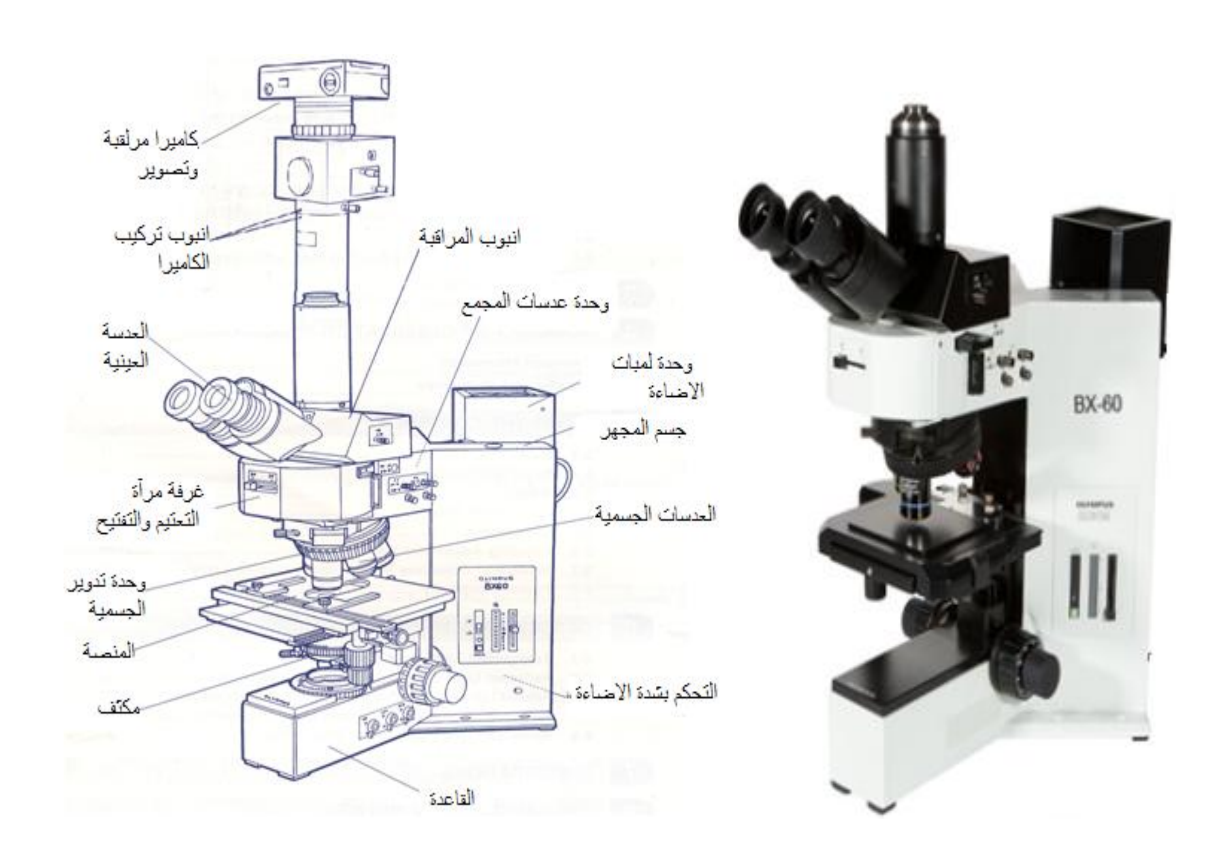
عبارة عن مجهر ضوئي ياباني الصنع ذي درجة تكبير من1000-50 مرة، يعمل بطريقة الضوء المنعكس.

أجزاء المجهر :

- جسم المجهر: يتكون من عدسيتين عينيتين في الأعلى بتكبير X10 تحوي إحداهما على تدريج ميكرومتري، وخمس عدسات جسمية مركبة على برج دوار بتكبير ,5X ,10X, 20X 50X, 100X ،

- حامل العينة: يمكنه الدوران والحركة في الاتجاهين X,Y بواسطة قبضة ميكرومترية ثنائية.
- نظام الإضاءة بالانعكاس: يقع في مؤخرة المجهر ويمكنه التحكم بشدة الاضاءة وضبطها اوتوماتيكياً للتصوير،
- نظام التصوير: يتكون من انبوب ضوئي أعلى البرج مركب عليه كاميرا فورية لالتقاط الصور الثابتة،
- نظام الفيديو: يتكون من كاميرا رقمية ملونة موصولة مع حاسب عبر بطاقة فيديو.

يوضح الشكل رقم (٦٦) صورة المجهر الضوئي Olympus وأقسامه.



الشكل رقم (٦٦)- المجهر الضوئي BX-60 M Olympus.

٢-٣-٢-٥ جهاز الاختبارات الميكانيكية العامة طراز D34.

آلة بسيطة وعملية من شركة Adamel LHomargy من أجل اختبارات الشد والضغط والانعطاف وهي مناسبة لاختبار المواد التي لا تزيد قوة تحملها عن ١٠ كيلو نيوتن. ويمكن وصل عدة ملحقات مع الآلة (حاسب – طابعة – راسمة) التي تعمل عبر حاسب للتحكم عن طريقه بمتحولات التجربة المختلفة ورسم منحني الاختبار الناتج والحصول على نتائج التجربة . تستخدم للاختبار عينات نظامية معيارية متناسبة مع الجهاز.

يوضح الشكل رقم (٦٧) جهاز الاختبارات الميكانيكية العامة وأجزاءه الرئيسة.



الشكل (٦٧)- جهاز الاختبارات الميكانيكية العامة طراز DY34 .

٢-٣-٢-٦ **جهاز قياس القساوة العام Hardness Tester** طراز HBRV-187.5.

صُمم هذا الجهاز لتحديد أرقام القساوة العادية على كل من سلم روكويل – برينل- فيكرز لمختلف الخلائط المعدنية الخام والمقساة وهو مستخدم بشكل واسع في معامل التشغيل والتعدين ومخابر الجامعات ومعاهد البحث العلمي لقياس القساوة. يقوم مبدأ عمل الجهاز على ضغط رأس ذي قساوة عالية وشكل محدد على سطح العينة بواسطة حمل مناسب ثم قياس أبعاد الأثر المتشكل على سطح العينة وتحديد قساوتها باستخدام جداول خاصة.

المواصفات الفنية:

- **الحمل المطبق:**

في طريقة برنيل : Kgf (187.5 ; 62.5 ; 31.25)،

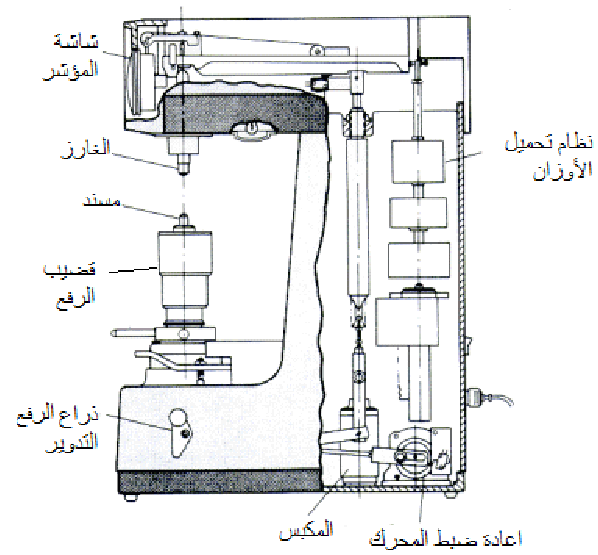
في طريقة روكويل: الحمل الأصغري (10 Kgf)،

الحمل الكلي للاختبار Kgf (150 ; 100 ; 60)،

في طريقة فيكرز : Kgf (100 ; 30)،

- أقطار الكرات الفولاذية 1.586 mm ؛ 2.5 ؛ 5،
- رأس مخروط ماسي: زاوية الرأس 120°±30´ مدبب نصف قطره 0.2 mm بدقة ±0.01،
- هرم رباعي ماسي : زاوية الرأس 136°±30´،
- الارتفاع الأعظمي للعينة 200 mm،
- العمق 160 mm،
- الأبعاد : 480 x 250 x 760 mm ،
- الجهد: 220 V ، التيار متناوب.

يوضح الشكل رقم (٦٦) المخطط الهندسي للجهاز مع أجزائه.





الشكل رقم (٦٨)- المخطط الهندسي لجهاز قياس القساوة العام.

٢-٣-٢-٧ جهاز قياس القساوة الميكروية Shimadzu طراز HMV-2000.

يستخدم لإجراء اختبارات القساوة الميكروية على سلم فيكرز تحت أحمال خفيفة لمختلف التطبيقات العلمية والصناعية والمخبرية وخاصة من أجل قياس القساوة السطحية للقطع المقساة سطحياً والمطلية بطبقات رقيقة من مواد قاسية (نتردة – كربنة – طلاء كروم – الخ...).

المواصفات الفنية:

- مجال قياس واسع (100-1200 Hv) وعند أحمال مختلفة من 2000 g -5 وهي :
(5 – 10 – 15 – 25 – 50 – 100- 200 -300 -500 -1000 -2000 g)
- يتم اختيار الحمل وزمن التحميل ورفع الحمل بشكل أوتوماتيكي،
- معالجة آلية للمعلومات وحساب القساوة،
- مزود بشاشة إظهار رقمية لأقطار الطبعة والنتيجة النهائية،
- مزود بنظام رؤية بصرية بتكبير قدره 50X لقياس الطبعة،
- التحكم بزمن التحميل منsec 60 -5،
- الوزنkg 42،
- الأبعاد mm 400x470x480.

يوضح الشكل رقم (٦٩) جهاز قياس القساوة الميكروية HMV-2000 مع أقسامه الرئيسة.



الشكل (٦٩)- جهاز قياس القساوة الميكروية HMV-2000.

٢-٣-٢-٨ جهاز قياس الكثافة والمسامية المفتوحة بطريقة أرخميدس.

يتألف هذا الجهاز ببساطة من وعاء زجاجي يوضع فيه سائل مناسب ومن حامل خاص مثبت على ميزان إلكتروني دقيق يسمح بوزن العينات قبل وأثناء وبعد غمرها بالسائل كما هو مبين في الشكل رقم (٧٠).





الشكل (٧٠)- جهاز قياس الكثافة بطريقة أرخميدس.

تتم عملية القياس وفق الخطوات التالية:

١- تحديد وزن العينة في الحالة الجافة m_0،

٢- نقع العينة في سائل معلوم الكثافة ρ_f لمدة كافية تسمح للسائل بالتغلغل ضمن المسامات المفتوحة وهنا يجب ألا يتفاعل السائل مع العينة قيد القياس وأن تكون كثافته أقل من كثافة العينة، وفي الكثير من الحالات، يكون استخدام الماء المقطر مناسباً لهذا الغرض.

٣- تحديد وزن العينة وهي معلقة ضمن السائل m_1،

٤- تحديد وزن العينة بعد النقع بوجود المحتوى المائي m_2،

عندها، يمكن حساب الكثافة الظاهرية للعينة من العلاقة:

$$\rho = m_0 / V_0 = m_0\, \rho_f \;/\; m_2 - m_1$$

عادة ما تكون دقة حساب الكثافة بطريقة أرخميدس $\pm 0.001\ g/cm^3$

تتعين المسامية المفتوحة عن طريق قياس قدرة العينة على امتصاص الماء، ويُعبَّر عنها من خلال كمية الماء التي تملأ الثقوب. ويتم حساب حجم المسامات المفتوحة باستخدام العلاقة التالية:

$$V_{op}= (m_2-m_o) / \rho_f$$

وتحدد النسبة المئوية للمسامية المفتوحة من خلال نسبة حجم المسامات المفتوحة إلى الحجم الكلي للعينة كما يلي:

$$OP \% = (V_{op} / V_0) x 100 = [(m_2-m_o) / (m_2-m_1)] x 100$$

يحدد مقدار الخطأ في قياس المسامية بحدود 0.1%.

٢-٣-٢-٩ **آلة الطحن والخلط بالكرات** ball-mill طراز (RETSCH PM 400).

وهي آلة مخبرية يمكن استخدامها في عملية طحن وخفض حجم حبيبات المسحوق إلى الحجم المطلوب ابتداءً من 10 mm وفي مزج المساحيق الميكانيكي الرطب أو الجاف وتأمين تجانس مزيجها. وتستخدم أيضاً في إنجاز عملية تكتيل وتغليف حبيبات الكربيد القاسية بالكوبالت قبل عملية الكبس.

- تعمل عبر آلية السحق وآلية الخلط الميكانيكي لمزيج المساحيق معاً وذلك بفعل قوة الطرد المركزي وحركة الكرات ضمن الجرن.
- يمكن سحق وخلط المواد الطرية ومتوسطة القساوة وعالية القساوة والمواد الهشة والليفية.
- سرعة دوران عالية 400 rpm -30 مع قرص دوار ذي قطر كبير300 mm لضمان الحصول على نعومة كبيرة ضمن وقت قصير.
- مكونة من 4 مراكز تستوعب 4 أجران للطحن بسعة 500 ml.
- تعطي نتائج إنتاجية متكررة وثابتة بسبب التحكم بالسرعة والطاقة.
- إمكانية عكس جهة الدوران.
- طبيعة العينات: رطبة أو جافة مع إمكانية تطبيق الغاز الخامل.
- تنوع في أوعية الطحن المتوفرة: ستانلس- كربيد التنغستن- الزركونيا- الألومينا.
- يمكن بواسطتها تنعيم حجم الحبيبات من 10 mm وحتى 1 ميكرون حسب حجم المسحوق الداخل ومعايرة معاملات الجهاز.

يبين الشكل رقم (٧١) نموذج لآلة الطحن والمزج الكوكبية بالكرات للمساحيق.



الشكل (٧١)– آلة طحن ومزج المساحيق المعدنية والسيراميكية بالكرات.

٢-٤ الطرائق

٢-٤-١-١ المواد الأولية.

يتضمن التركيب الكيميائي لمادة اللقمة المعيارية لشركة ساندفيك والذي ينطبق على معظم اللقم الكربيدية الأخرى وفقاً لما بيَّنه التحليل الكيميائي AAS ، ما يلي:

كربيد التنغستن 92% - كوبالت 7.5%

ويتألف الباقي ما نسبته 0.5 % ، من Fe و Si . أنظر الملحق رقم (2).

من جهة أخرى، يتألف تركيب المسحوق الذي تم تأمينه واستخدامه في هذا المشروع من أحد الجهات ويحمل الرمز PK8 وفق التصنيف المعياري الدولي، من العناصر التالية:

WC : 91%،

Co : 8 %،

(Ti + Fe + Si) : 1%.

وينسجم هذا التركيب إلى حد بعيد مع التركيب الكيميائي للقمة الكربيدية المرجعية، وقد تم إجراء التحليل الكيميائي الدقيق بطريقة AAS للتأكد من تركيب هذا المسحوق المستخدم قبل التلبيد وبعده وكانت النتيجة وفق التحليل الوارد في الملحق رقم (2).

٢-٤-١-٢ قياس التوزع الحبيبي للمساحيق.

- ✓ يوزن كمية مقدارها 100 g من مسحوق كربيد التنغستن والكوبالت،
- ✓ مجموعة المناخل المستخدمة هي المجموعة طراز AS200 Control g،
- ✓ قياسات المناخل المستخدمة في القياس هي على التوالي:

  (20 , 45 , 63 , 90 , 125 , 180 , 250 , 355) ميكرون متر،
- ✓ توضع كمية المسحوق الكربيدي التي تم وزنها في المنخل العلوي ذي القطر الأكبر،
- ✓ المطال 2 mm ،
- ✓ الفاصل الزمني 5 sec.،
- ✓ مدة النخل 30 min .

عند الانتهاء من عملية النخل، تفرغ الكمية المتبقية في كل منخل وتوزن، ويتم بعدها حساب النسبة المئوية للكمية المتبقية في كل منخل وتمثيلها بيانياً.

٢-٤-١-٣ فحص الانسيابية.

توزن كمية مقدارها 50 g من الخليط المسحوقي 92% كربيد التنغستن – 8 % كوبالت ومن ثم وضعها في فتحة جهاز فحص الانسيابية (Hall Flowmeter) وملاحظة شكل انسياب المسحوق وقياس الزمن اللازم لمرورها عبر فتحة الجهاز السفلية (3.2 mm).
تبين أن المسحوق المدروس ذا انسيابية ضعيفة وذلك بسبب شكل الحبيبات (غير الكروي).

٢-٤-١-٤ قياس الكثافة الظاهرية (Apparent Density).

يتم قياس الكثافة الظاهرية للمسحوق (كربيد 92 % + كوبالت 8 %) قبل التحبيب وبعده على مقياس الكثافة باستخدام وعاء مدرج يتم ملئ حجم مقداره ($10\ cm^3$) فيه من مسحوق (كربيد التنغستن + كوبالت) ومسح السطح بشكل مستو تماماً مع الهز والرج اليدوي الخفيف. يوزن بعد ذلك كمية هذا المسحوق وتعطى الكثافة الظاهرية بالعلاقة :

$$\rho_{apparent} = m / V$$

m وزن المسحوق الناتج: 47 g،

V حجم المسحوق: $10\ cm^3$،

ρ_a الكثافة الظاهرية للمسحوق (g/cm^3).

$$\rho_{apparent\ (92\%\ WC\ -\ 8\ \%\ CO)} = m / v = 47 / 10 = 4.7\ g/cm^3$$

٢-٤-١-٥ الفحص المجهري للمسحوق.

يتم وضع كمية قليلة من مسحوق كربيد التنغستن – الكوبالت على شريحة زجاجية رقيقة ثم يتم دراسة شكل الحبيبات بواسطة المجهر الضوئي بتكبير مناسب (500X;1000X).

٢-٤-٢ الكبس وتحضير المضغوطات.

٢-٤-٢-١ إعداد وتهيئة المزيج.

يتم إعداد وتحضير مزيج المساحيق وتحبيبه تمهيداً لكبسه وذلك من أجل الحصول على كمية محددة منه تكفي لكبس عدد من العينات الأولية للقم بحدود ١٥غ لكل قطعة. يتم تجانس مزج المساحيق بواسطة الخلط الجاف في المطحنة Planetary ball mill ولمدة ساعتين. وتعدُّ هذه العملية مهمة حيث يعمل الطحن الجاف على بعثرة ومزج حبيبات مكونات المزيج المختلفة قبل اجراء المزج الرطب. تتضمن هذه العملية المراحل التالية:

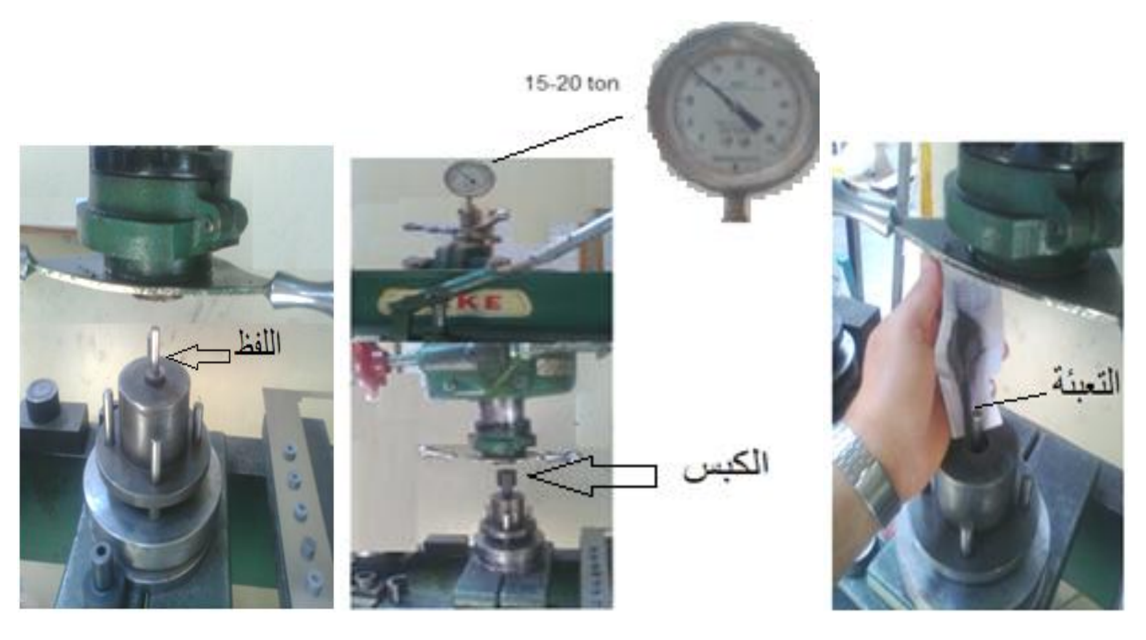
- ✓ وزن كمية 150 g من مزيج المساحيق (WC– 8wt% Co) الحبيبي والمطحون طحناً جافاً،
- ✓ وزن كمية من المواد الرابطة العضوية (green Binder) اللازمة لعملية الربط بنسبة وزنية مقدارها 5% من مجمل وزن المسحوق الكربيدي أي ما يعادل 7.5 g من المواد التالية:
  % 70 بولي فينيل اسيتات (polyvinyl acetate PVAc) غروية بيضاء اللون تستخدم كمادة ربط أساسية،
  % 30 بولي ايتيلن غليكول عبارة عن سائل شفاف اللون،
  1% ستيارات الزنك (zinc stearate) عبارة عن مسحوق أبيض كمادة مزلقة للكبس.
- ✓ إضافة كمية 5 g من الكحول الايتيلي من أجل إجراء عملية المزج الرطب.
- ✓ مزج المواد السابقة بواسطة ملوق معدني ضمن دورق زجاجي (مزج رطب) يدوياً لمدة ٣٠ دقيقة حتى الحصول على تجانس جيد وتوزع حبيبي منتظم.
- ✓ تجفيف المزيج ضمن وعاء معدني من الستانلس في فرن التجفيف عند 90 ℃ ولمدة زمنية كافية (٦٠ دقيقة).
- ✓ تنخيل المسحوق بواسطة منخل خشن فتحة 0.3mm من أجل الحصول على تحبيب المسحوق.

وزن كمية 20 g من أجل كل مضغوطة على حده في صحون بلاستكية مختلفة الحجم تمهيداً لكبسها. يتم اختيار هذا الوزن المناسب للمضغوطة ليتلائم مع حجم فجوة القالب وسماكة العينة المطلوبة وشوط الملئ وقيم الضغط المطبقة.

٢-٤-٢-٢ الكبس.

- مرحلة ملء القالب بالمسحوق الكربيدي.
- يتم كبس العينات الخمس في القالب الأولي ذي القطر الداخلي 20mm ومن كلا الطرفين باستخدام المكبس الآلي الهيدروليكي طراز Enerpac-100Ton وبأحمال متزايدة تدريجياً تتراوح في المجال (5-25 ton)، ابتداء من ١٨٥ ميغا باسكال للعينة الأولى وانتهاء بـ ٩٢٥ ميغا باسكال للعينة الخامسة ولمدة ٣٠ ثانية لكل مرة .
- تم كبس العينات التالية ضمن قالب الكبس النهائي قطر 18mm ومن كلا الطرفين وذلك بعد تحديد نسبة انكماش الأبعاد من نتائج التجربة الأولى، حيث تم كبس٧عينات باستخدام المكبس اليدوي الهيدروليكي طرازDAKE-50T عند حمل قدره (20-15) طن ولمدة زمنية ٣٠ ثانية لكل مرة، نظراً لعدم جدوى زيادة الحمل أعلى من هذه القيمة كما تبين من نتائج التجربة الأولى.
- تم كبس عينات كربيدية معيارية لأجل استخدامها في قياس متانة التحطم على الانعطاف على جهاز اختبار الانعطاف (٣ نقاط) وذلك باستخدام قالب كبس عينات اختبار بالأبعاد النظامية (60 mm *6*8) وفق المعايير الدولية لهذا الاختبار، حيث تم وزن وقدره ٢٥غ من مسحوق الخليطة (8% Co 92% WC) من أجل العينة الواحدة ثم تم كبس العينات عند ضغط كبس MPa (635 - 529) لمدة ٣٠ ثانية في كل مرة، باستخدام المكبس اليدوي الهيدروليكي طراز DAKE-50T ومن جهة واحدة.

يبين الشكل رقم (٧٢) مراحل عملية الكبس في القالب على المكبس DAKE-50T .



الشكل (٧٢)- مراحل عملية الكبس على المكبس DAKE-50T .

٢-٤-٢-٣ قياس الكثافة الرطبة (الخضراء) (Green Density).

تعطى الكثافة الرطبة (الخضراء) ρ_g بالعلاقة:

$$\rho_g = m_g / v_g \quad (g/cm^3)$$

حيث m_g : وزن العينة المضغوطة الرطبة (الخضراء) قبل التلبيد (g)،
v_g: حجم العينة المضغوطة الرطبة (الخضراء) قبل التلبيد (cm^3).

وتعطى المسامية (Porosity) الرطبة (الخضراء) قبل التلبيد بالعلاقة:

$$P_g\ \% = [\ 1 - (\ \rho_g / \rho_{th}\ )\ ]\ \%$$

حيث ρ_g : الكثافة الرطبة (الخضراء) (g/cm^3)،
ρ_{th} : الكثافة النظرية (g/cm^3) .

في حالة مزيج كربيد التنغستين والكوبالت، تحسب الكثافة النظرية وفق العلاقة التالية:

$$\rho_{th\ (8\%Co\ +\ 92\%WC)} = \frac{1}{\frac{w_{WC}}{\rho_{WC}} + \frac{w_{Co}}{\rho_{Co}}}$$

حيث w_{Co} و w_{WC} النسب الوزنية لكل من مسحوقي كربيد التنغستن والكوبالت في المزيج.

الكثافة النظرية لكربيد التنغستن: $\rho_{WC} = 15.6\ (g/cm^3)$

الكثافة النظرية للكوبالت: $\rho_{Co} = 8.9\ (g/cm^3)$

الكثافة النظرية لمزيج (8%Co+92% WC): $\rho_{(8\%Co+92\%WC)} = 14.71\ g/cm^3$

٢-٤-٢-٤ دراسة علاقة الكثافة الخضراء بضغط الكبس.

تم كبس ٥ مضغوطات من اللقم على القالب بقطر ٢٠ مم مع تغيير الحمل بشكل متزايد تدريجياً عند القيم 925 MPa ; 726 ; 544 ; 370 ; 185 باستعمال المكبس الهيدروليكي الآلي طراز 100T ولمدة ٣٠ ثانية، ثم دراسة أثر ازدياد الضغط المطبق على قيم الكثافة الخضراء للمضغوطات وتمثيلها بيانياً.

٢-٤-٣ التلبيد والمعالجات الحرارية.

تعدُّ عملية التلبيد أحد أهم العمليات في تقانة المساحيق، وتتأثر هذه العملية بعدد من المتغيرات العملية، ومن أبرزها، جو التلبيد، منحني الحرارة– زمن $T(°C) = f(t)$.
كانت الخيارات المتاحة لتنفيذ برنامج التلبيد هي إما فرن التخلية 1350 °C الذي لايكفي للوصول الى حرارة التلبيد المطلوبة 1475 °C بالرغم من تحقيقه لشروط جو التلبيد (خلاء أو هيدروجن)، أو فرن المعالجة الحرارية الكتيم طراز HT1600M تحت جو من غاز الآزوت أو الآرغون.
نظراً لعدم توفر الفرن المناسب من حيث تحقيق درجة الحرارة والجو المطلوبين، تضمنت محاولات التلبيد التجارب التالية:

- ✓ التلبيد في جو من الآزوت عند الدرجة 1475 °C،
- ✓ التلبيد في جو من الآرغون عند الدرجة 1475 °C،
- ✓ التلبيد في جو من الخلاء عند الدرجة 1300 °C،
- ✓ التلبيد على مرحلتين:
  - المرحلة الأولى: في جو من الخلاء عند الدرجة 1300 °C؛
  - المرحلة الثانية: في جو من الآرغون عند الدرجة 1475 °C ضمن مسحوق MgO .

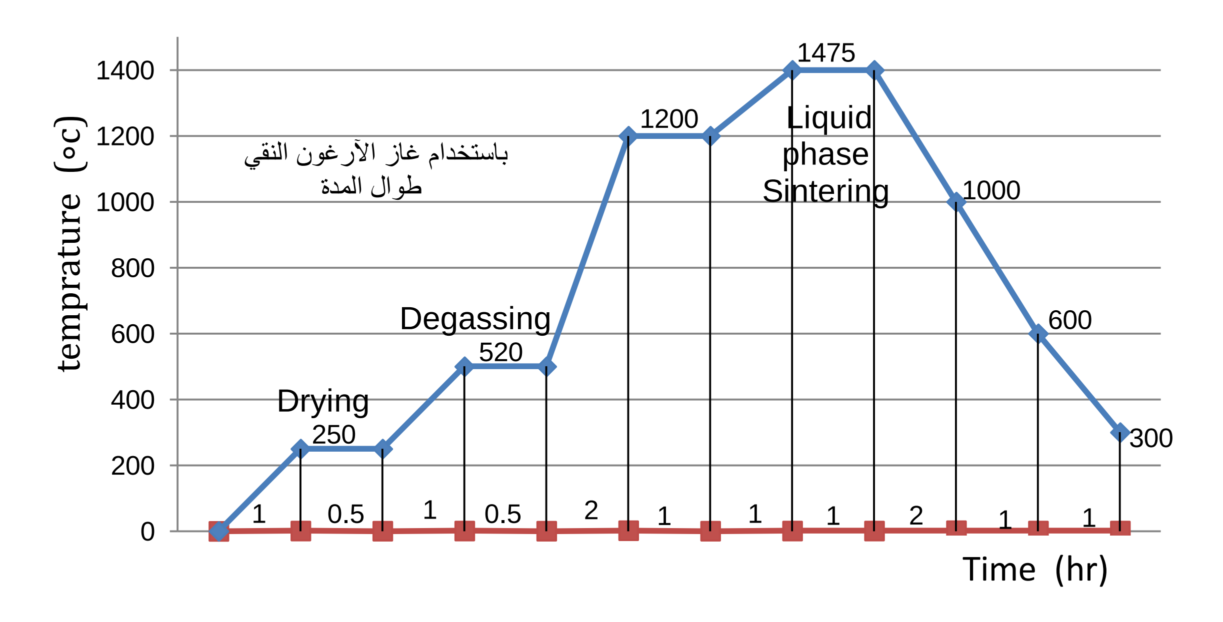
٢-٤-٣-١ التلبيد في جو من الآزوت N_2 (Sintering under Nitrogen).

تم التلبيد في الفرن الكتيم HT 1600 M باستخدام غاز الآزوت كغاز حماية (اسطوانة مخبرية) وتم ضبط مقياس التدفق في الفرن عند القيمة % 30. كما تم وضع البرنامج الحراري التالي:

- ✓ تسخين بسرعة ٥ درجة/دقيقة حتى الدرجة 250 °C .
- ✓ التثبيت على هذه الدرجة لمدة ٦٠ دقيقة (مرحلة التجفيف).
- ✓ تسخين بسرعة ٥ درجة/دقيقة حتى الدرجة 520 °C.
- ✓ التثبيت على هذه الدرجة لمدة ٦٠ دقيقة (مرحلة حرق وازالة الرابط العضوي).
- ✓ تسخين بسرعة ٥ درجة/دقيقة حتى الدرجة 1200 °C.
- ✓ التثبيت على هذه الدرجة لمدة ٦٠ دقيقة.
- ✓ تسخين بسرعة ٦ درجة/دقيقة حتى الدرجة 1475 °C .
- ✓ التثبيت على هذه الدرجة لمدة ٦٠ دقيقة (مرحلة التلبيد والتكثيف).
- ✓ التبريد حتى درجة حرارة الغرفة بسرعة ١٠ درجة / دقيقة .

٢-٤-٣-٢ التلبيد في جو من الآرغون Ar ‎(Sintering under Argon).

تم اجراء عملية التلبيد في الفرن الكتيم HT 1600 M حتى الدرجة 1475 °C للمضغوطات من المزيج المسحوقي (8%Co +92%WC) المضاف إليه رابط بنسبة قدرها (5-7)%wt، المكبوسة عند ضغط قدره 545 MPa والمجففة عند 100 °C لمدة 24 ساعة في فرن (Air Forced). استُخدم غاز الآرغون كغاز حماية وضُبط مقياس التدفق في الفرن عند القيمة 30%، كما تم وضع البرنامج الحراري التالي والمبين في الشكل رقم (٧٣):



الشكل (٧٣)- برنامج التلبيد في الفرن الكتيم مع استخدام غاز الآرغون كحماية.

٢-٤-٣-٣ التلبيد في جو من الخلاء.

أ- التلبيد وحيد المرحلة في جو من الخلاء عند الدرجة 1300 °C.

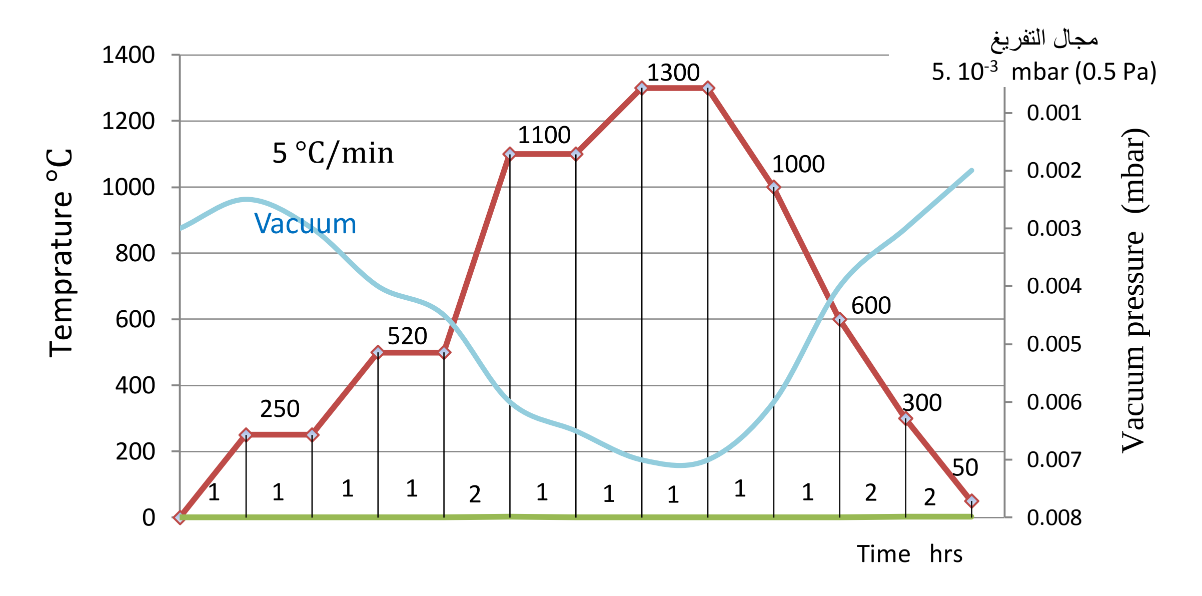
- ✓ تصنف تقانة التلبيد ضمن فرن التخلية كأنسب اجراء يمكن استخدامه في مجال تلبيد اللقم والأدوات الكربيدية وتأتي أفران الهيدروجين كخيار ثاني (غير متوفر محلياً)، وقد تمت تجربتنا في فرن التخلية (High Vacuum) Fulgura ECM 1350 °C وكانت النتائج جيدة من حيث تجانس شكل وأبعاد العينات الملبّدة وحالة السطح وكذلك البنية الداخلية للعينات والمحافظة على الخواص المغناطيسية ومحتوى الكوبالت في عينات اللقم.

- ✓ تم اجراء عملية التلبيد للمضغوطات من المزيج المسحوقي (8%Co + 92%WC) المضاف اليه رابط بنسبة قدرها 5%wt، المكبوسة عند ضغوط متدرجة في التزايد والمجففة عند 100 °C لمدة 24 ساعة في فرن (Air Forced) ، في فرن التخلية وذلك بوضعها على قاعدة ثابتة من الغرافيت لتأمين أكبر تجانس حراري ممكن ، وبوجود حساسات حرارية مرنة بجانب القطع حسب الشكل رقم (٧٤)، ووفق البرنامج الحراري المبين في الشكل رقم (٧٥) .





الشكل (٧٤)– مرحلة التلبيد وتوضع العينات ضمن فرن التخلية



الشكل (٧٥)- برنامج التلبيد في فرن التخلية عند 1300 °C- 0.5Pa

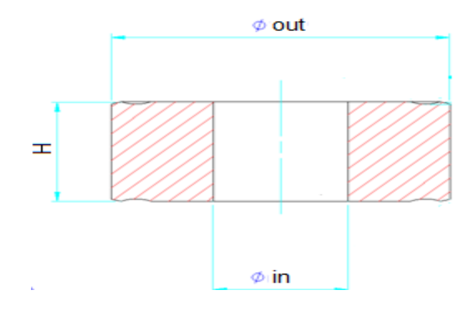
وبعد تنفيذ برنامج التلبيد في فرن التخلية عند 1300 °C تم فتح الفرن واخراج القطع عند درجة حرارة الوسط المحيط، ثم اجراء قياسات الوزن والأبعاد والحجم وحساب نسب الانكماش الحجمية والوزنية وايجاد قيم الكثافة, والمسامية وقياس قساوة القطع.

ب- التلبيد ثنائي المرحلة في جو من الخلاء.

(في فرن التخلية عند 1300 °C والمتابعة حتى 1470 °C في مسحوق خامل)

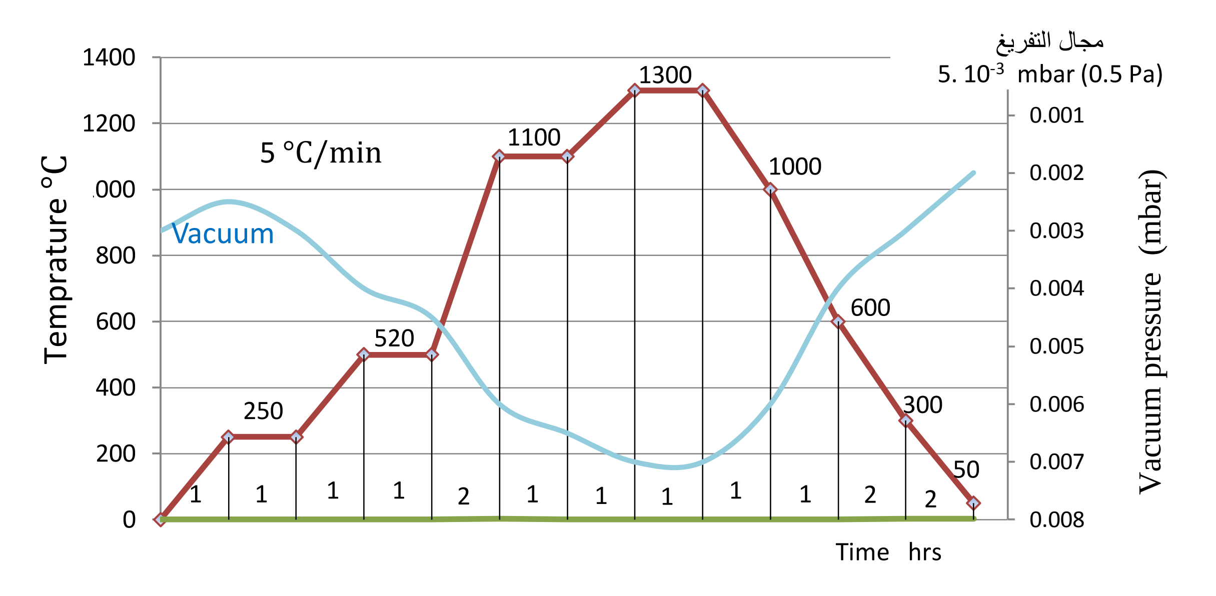
١- تجربة عينات اللقم.

في هذه التجربة أجريت عملية التلبيد لسبع مضغوطات من اللقم قطر ١٨مم مكبوسة عند ضغط قدره 600 MPa من المزيج المسحوقي (8%Co + 92%WC) المضاف اليه رابط بنسبة 5 %wt ، والمجففة ضمن فرن تجفيف ذو دفع مروحي عند 100 °C لمدة 24 ساعة.



تمت عملية التلبيد على مرحلتين متتاليتين:

الأولى ضمن فرن التخلية عند 1300°C ووضعت العينات على مسند غرافيتي موزعة على طول الفرن وتم وضع وتنفيذ برنامج التلبيد الحراري التالي شكل رقم (٧٦).



الشكل (٧٦)– برنامج التلبيد مرحلة (١) ضمن فرن التخلية.

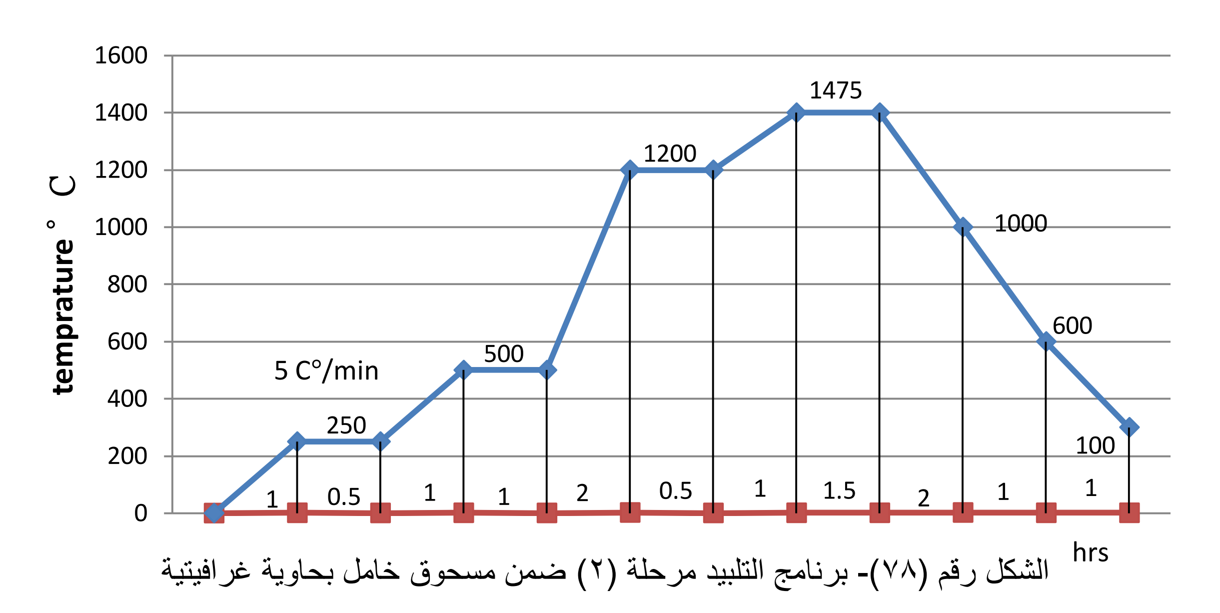
تم اخراج العينات من الفرن عند درجة حرارة الغرفة ومن ثم تم اعداد وتجهيز حاوية مصنعة من الغرافيت بأبعاد مناسبة (130L*80W*80H) مع غطاء علوي وسفلي لإجراء المرحلة الثانية من عملية التلبيد، حيث تم صف العينات ضمن الحاوية وتم غمر اللقم في مسحوق خامل من المغنيزيا MgO المطحون والمجفف، مع الرك الجيد لاخراج الهواء ، تم إغلاق الحاوية بغطاء غرافيتي من الطرفين واحكامها جيداً وفق الشكل رقم (٧٧).

أجريت مرحلة التلبيد الثانية عند 1475°C مع تطبيق جو غاز الآرغون داخل فرن المعالجة الحرارية الكتيم HT1600M طوال فترة العملية.



الشكل (٧٧)– مرحلة التلبيد ضمن حاوية غرافيتية ومسحوق خامل.

تم في المرحلة الثانية وضع وتنفيذ برنامج التلبيد التالي والمبين في الشكل رقم (٧٨) :



الشكل رقم (٧٨)- برنامج التلبيد مرحلة (٢) ضمن مسحوق خامل بحاوية غرافيتية

تم اخراج الحاوية الغرافيتية من الفرن في اليوم الثاني عند درجة حرارة الغرفة ومن ثم فك الغطاء وتفريغها واخراج القطع من الحاوية بعد ازالة المسحوق الخامل MgO عنها كما هو مبين في الشكل (٧٩).



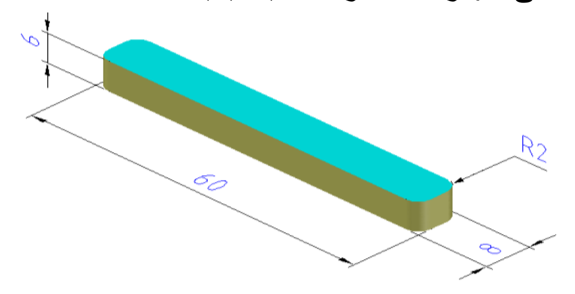
الشكل رقم (٧٩)– عينات اللقم الملبدة على مرحلتين (جو مخلى – مسحوق خامل).

تم اجراء قياسات الوزن والأبعاد والحجم وحساب نسب انكماش الأبعاد والفقد الوزني وإيجاد قيم الكثافة والمسامية وقياس قساوة القطع على مقياس روكويل باستخدام السلم A والسلم C.

٢- تلبيد عينات الانعطاف ثنائي المرحلة في جو من الخلاء.

تم اجراء هذه التجربة من أجل الحصول على عينات كربيدية معيارية يمكن استخدامها في قياس مقاومة الانعطاف على جهاز اختبار الانعطاف (٣ نقاط) بالأبعاد النظامية (60 mm * 6 *8) وفق المعايير الدولية لهذا الاختبار.

تم تجفيف المضغوطات وقياس وزنها وحجمها وايجاد الكثافة والمسامية الخضراء ، وقياس المتانة الخضراء على الانعطاف على جهاز الاختبارات الميكانيكية DY34 .



تم اجراء عملية التلبيد للعينات بنفس الاجراء المطبق على العينات السابقة (1300°C) في فرن الخلاء ثم المتابعة حتى 1475 °C في الفرن الكتيم ضمن مسحوق خامل في حاوية غرافيتية) وتم استخدام برنامج التلبيد ذاته وبعد ذلك تم اختبار مقاومة الانعطاف على جهاز الاختبارات الميكانيكية DY34.

٢-٤-٤ توصيف اللقم الكربيدية بعد التلبيد.

٢-٤-٤-١ قياس الكثافة والمسامية.

تعطى الكثافة التجريبية بعد التلبيد ρ بالعلاقة :

$$\rho = m / v \quad (g/cm^3)$$

حيث m : وزن العينة المضغوطة بعد التلبيد (g)،

V : حجم العينة المضغوطة بعد التلبيد (cm^3)،

كما تعطى الكثافة النسبية $\rho_{Relative}$ بنسبة الكثافة التجريبية على الكثافة النظرية وفق العلاقة :

$$\rho_R \% = \rho / \rho_{th} \times 100 \%$$

حيث ρ: الكثافة التجريبية بعد التلبيد (g/cm^3).

ρ_{th} : الكثافة النظرية (g/cm^3) .

أما المسامية بعد التلبيد P، فتعطى بالعلاقة :

$$P\ \% = [\ 1 - (\ \rho / \rho_{th}\ )\ ]\ \%$$

٢-٤-٤-٢ قياس انكماش الأبعاد والفقد الوزني.

تتعرض العينات بعد عملية التلبيد لتغيرات في الأبعاد وأحياناً في الوزن. تسمى تغيرات الأبعاد بالانكماش (shrinkage). ويرتبط ذلك بدقة في تصميم وتصنيع القوالب وتحديد الوزن الأولي عند تلقيم مسحوق المضغوطات.

يحسب الفقد الوزني من العلاقة :

$$\Delta M\ \% = M_2 - M_1 / M_1 * 100\ \%$$

ويحسب الانكماش الحجمي من العلاقة :

$$\Delta V\ \% = V_2 - V_1 / V_1 * 100\ \%$$

حيث M_2 ، V_2 وزن وحجم المضغوطة بعد التلبيد، و M_1 ، V_1 وزنها وحجمها قبل التلبيد.

٢-٤-٤-٣ الفحص المجهري:

أ- الفحص المجهري لعينات اللقم الرطبة (الخضراء).

تم اختيار عينة من اللقم المكبوسة الرطبة (الخضراء) وتم فحص البنية على السطح بدون تجليخ أو تلميع أو معالجة كيميائية بواسطة المجهر الضوئي BX 60M – Olympus وبتكبير (100X- 500X-1000X).

ب- الفحص المجهري لعينات اللقم الملبدة.

تم اختيار عينة من اللقم الملبدة وتم جلخها على مجلخة العدد بواسطة قرص ألماس مخصص لهذا الغرض نظراً للقساوة العالية للعينات ، ثم تم صقل العينة على آلة صقل العينات leco طراز VP – 160 باستعمال أوراق صقل بدءاً من الأخشن فالأنعم وفق درجة الخشونة كما يلي:

- ✓ الصقل على ورق صقل بدرجة خشونة 120 ،
- ✓ الصقل على ورق صقل بدرجة خشونة 240 ،
- ✓ الصقل على ورق صقل بدرجة خشونة 400 ،
- ✓ الصقل على ورق صقل بدرجة خشونة 600 ،
- ✓ الصقل على ورق صقل بدرجة خشونة 800 ،
- ✓ الصقل على ورق صقل بدرجة خشونة 1000 ،
- ✓ الصقل على ورق صقل بدرجة خشونة 1200 .

مع مراعاة تدوير العينة بين المرحلة والأخرى بزاوية 90 درجة لإزالة خطوط الصقل الناتجة عن المرحلة السابقة مع التبريد المستمر بالماء طوال الصقل. وتم استخدام سرعة الجلخ 200 rpm .

- ✓ **التلميع** : تم التلميع على نفس الآلة باستخدام قرص لباد ناعم مع إضافة معجون ألماس بسرعة دوران 500 دورة/دقيقة.
- ✓ **التنميش:** لاظهار البنية والأطوار في الخليطة WC– 0.8W% Co ، هناك ثلاث كواشف تستخدم لهذا الغرض حسب المعيار ASTM B 390 أهمها:

كاشف موراكامي (Murakami's reagent):

$10g\ K_3Fe(CN)_6$, 10g NaOH , 100 mL H_2O

كاشف ذو أساس من كلوريد الحديد:

Ferric chloride 3 g $FeC1_3$, 100 mL H_2O

تم تحضير وتركيب محلول معالجة كيميائية للتنميش لاظهار بنية الكربيد والكوبالت الملبّد وفق البند الثاني.

تم غمر العينة في المحلول المركب لمدة 30 ثانية .

تم الفحص على المجهر الضوئي BX 60M –Olympus بواسطة الضوء المنعكس وبتكبير قدره (500X–1000X).

تم اختيار إحدى العينات من اللقم الملبدة وقصها على آلة القص بالسلك (حت بالشرر دون تخريب لسطح القص) للحصول على مقطع عرضي فيها لفحص البنية الداخلية مباشرة دون جلخ أو تنميش على المجهر الضوئي بتكبير (500X) والكشف على المسامية والفجوات الداخلية.

٢–٤–٤–٤ قياس الخواص الميكانيكية.

٢–٤–٤–٤–١ اختبار الانعطاف.

أ– اختبار الانعطاف للعينات الخضراء.

تم قياس مقاومة الانعطاف للعينات الرطبة (الخضراء) المكبوسة قبل التلبيد عبر إجراء اختبار الانعطاف على عينات مسطحة ذات مقطع مستطيل بطول 60 mm وعرضmm 8 وسماكة 6 mm وعند ضغط كبس 600 MPa لمدة ٣٠ ثانية ولكل العينات.

تم الاختبار على ٤ عينات قبل التلبيد بواسطة آلة الاختبارات الميكانيكية العامة حيث تم تركيب وحدة اختبار الانعطاف على الآلة وتعيير البعد بين المسندين ثم قياس سماكة العينة بدقة وبرمجة التجربة على الحاسب ثم وضع العينة على المسندين وإنزال الفك المتحرك بحيث يحقق التلامس مع سطح العينة .

شروط اجراء الاختبار :

- ✓ البعد بين المسندين: $L = 40$ (mm) .
- ✓ تحميل بثلاثة نقاط.
- ✓ سرعة الاختبار 1(mm/min) .

وتحسب المتانة الخضراء بنفس معادلة اختبار الانعطاف وهي:

$$S = 3PL / 2t^2 W$$

حيث S : المتانة الخضراء وتقدر بـ (N/mm^2) أو MPa،

P: القوة العظمى اللازمة لكسر العينة مقدرة بـ (N)،

L: البعد بين المسندين: 40mm،

W : عرض العينة مقدر بـ (mm)،

t : سماكة العينة مقدرة بـ (mm).

ب- اختبار الانعطاف للعينات الملبدة.

تم قياس مقاومة الانعطاف للعينات بعد التلبيد عبر إجراء اختبار الانعطاف على عينات مسطحة ذات مقطع مستطيل بطول 51.5 mm وعرض 6.5 mm وسماكة 5 mm.

تم الاختبار على ٤ عينات ملبدة بواسطة آلة الاختبارات الميكانيكية العامة كما عرض سابقاً.

تحسب مقاومة الانعطاف σ_b بواسطة العلاقة التالية:

$$\sigma_b = 3PL / 2 t^2 W$$

أما معامل يونغ E_b، فيحسب بالمعادلة : $E_b = L^3 m / 4 t^3 w$

حيث m : ميل الجزء الخطي من منحني الانعطاف (القوة P بدلالة الانحناء Y) $P = f(Y)$.

٢-٤-٤-٢ اختبار القساوة (Hardness Test) :

يعد مؤشر القساوة من أهم المعاملات التي يمكن أن يستخدم لمقارنة وتوصيف اللقم الكربيدية لما تتمتع به هذه اللقم من قساوة فائقة. هناك طريقتان لقياس قساوة الكربيد الملبد وهما:

أ- اختبار القساوة الماكروية بطريقة روكويل (Hardness Rockwell HR).

تم اختيار طريقة روكويل في القياس لأنها تغطي مجال القساوات العالية التي تتمتع بها الكربيدات، وغالباً ما يستخدم لهذا الغرض السلّم A (HRA) والسلّم C (HRC). وهناك جداول تحويل ما بين السلّمين.

تستخدم طريقة روكويل مخروط ماسي زاوية رأسه $120°$ مخصص لاختبار المواد القاسية حيث يقاس مقدار عمق الغرز ضمن القطعة (h). تتحدد قيمة القساوة للعينة عن طريق تطبيق حمل أولي صغير (10 Kg) مدة من الزمن يليه حمل كبير نهائي (60 أو 150 Kg) بحسب المجال المختار ثم الحصول مباشرة على قيمة القساوة. أما الأحمال المطبقة، فهي كبيرة وتتراوح ضمن المجال Kg(150 – 100 – 60)، حيث يغطي المجال C، للخلائط القاسية وفولاذ العدة المقسى، القيم (HRC 68 – 20) باستخدام حمل قدره 150 Kg.
أما المجال A فهو مخصص للكربيدات والسيراميك باستخدام حمل قدره 60 Kg حفاظاً على العينات فائقة القساوة من التحطم ويغطي القيم (HRA 90 – 60).

تم اختبار كافة العينات الملبدة على جهاز قياس القساوة العام Hardness Tester طراز HBRV –187.5 حيث تم أولاً تركيب رأس القياس الخاص بقياس قساوة روكويل (مخروط ماسي) وتحديد الحمل 60 Kg على المجال A ومن ثم 150 Kg على المجال C وذلك بعد معايرة الجهاز على المادة المعيارية الملحقة به وذلك لمختلف العينات الملبدة في كافة التجارب.

ب- اختبار القساوة العادية بطريقة فيكرز (Hardness Vickers HV).

تم أيضاً اختبار قساوة عينات الكربيد باستخدام طريقة فيكرز نظراً للأحمال المنخفضة المطبقة في هذه الطريقة (30 kg) ولمدة 30 ثانية مع استخدام رأس هرم رباعي من الماس زاوية رأسه $136°$ حيث يتشكل أثر على شكل معين له قطران d_1 و d_2 يتم قياسهما بواسطة مجهر ضوئي وحساب القطر الوسطي $d = (d_1+d_2)/2$ وقساوة فيكرز من العلاقة :

$$HV = 1.8544\ F / d^2$$

حيث F الحمل المطبق بالكغ.

تحتاج هذه الطريقة أن يكون سطح العينات مصقولاً ولامعاً من أجل التمكن من قياس أقطار الأثر.
تم اجراء القياس على جهاز قياس القساوة العام Hardness Tester طراز HBRV–187.5 حيث تم تركيب رأس القياس الخاص بقساوة فيكرز عليه وتحديد الحمل 30 kg ثم معايرة الجهاز على البلوك الخاص الملحق به وإجراء خمسة قياسات على الأقل لكل عينة مع الابتعاد عن مواقع المسامات والحصول على قيم قساوة فيكرز مباشرة من الجداول المرفقة.

الفصل الثالث
النتائج والمناقشة

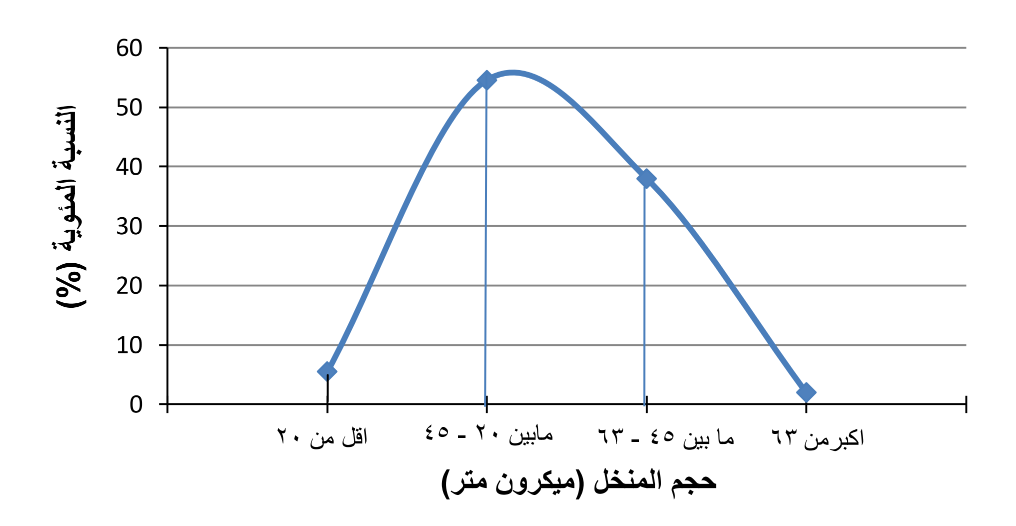
٣-١ نتائج قياس التوزع الحبيبي لمزيج كربيد التنغستين والكوبالت.

يوضح الجدول رقم (١٣) نتائج قياس التوزع الحبيبي لمسحوق كربيد التنغستن والكوبالت.

الجدول رقم (١٣)- نتائج قياس التوزع الحبيبي لمسحوق كربيد التنغستن والكوبالت.

فتحة المنخل (ميكرون متر)	الكمية (غرام)	النسبة المئوية (%)
أكبر من 63	1.984	1.984
45 - 63	37.977	37.977
20 - 45	54.539	54.539
أقل من 20	5.5	5.5

وبالتالي يكون منحني التوزع الحبيبي للمسحوق (WC- Co) المختبر من النمط أحادي النمط كما هو موضح في الشكل رقم (٨٠).



الشكل (٨٠)- منحني التوزع الحبيبي للمسحوق (WC- Co).

يمكن ملاحظة أن أبعاد الحبيبات في الخليطة الكربيدية تقع ضمن المجال الميكرومتري (أصغر من 63µ).

٣-٢ نتائج قياس الكثافة والمسامية الظاهرية للمسحوق.

أ- حساب الكثافة الظاهرية لمسحوق الخليطة (92WC % - Co 8%).

m وزن المسحوق الناتج (غرام) 47 g

V حجم المسحوق (سم٣) 10 ml

ρ_a الكثافة الظاهرية للمسحوق (غ / سم٣)

$$\rho_{\text{apparent}\ (92\%\ WC\ -\ 8\ \%\ Co)} = m / v = 47 / 10 = 4.7\ g/cm^3$$

ب- حساب المسامية في حالة الكثافة الظاهرية للخليطة (92WC % - Co 8%):

$$P\% = 1 - \rho_a / \rho_{th}\ \%$$

الكثافة النظرية للخليطة (92 WC % - Co 8%) :

$$\rho_{th} = \frac{1}{\frac{0.92}{15.6}+\frac{0.08}{8.9}} = \underline{14.7}\ g/cm^3$$

بالتعويض نجد: $P\% = 1 - (4.7/ 14.7) = 68\ \%$

٣-٣ نتائج دراسة علاقة الكثافة الرطبة (الخضراء) بضغط الكبس.

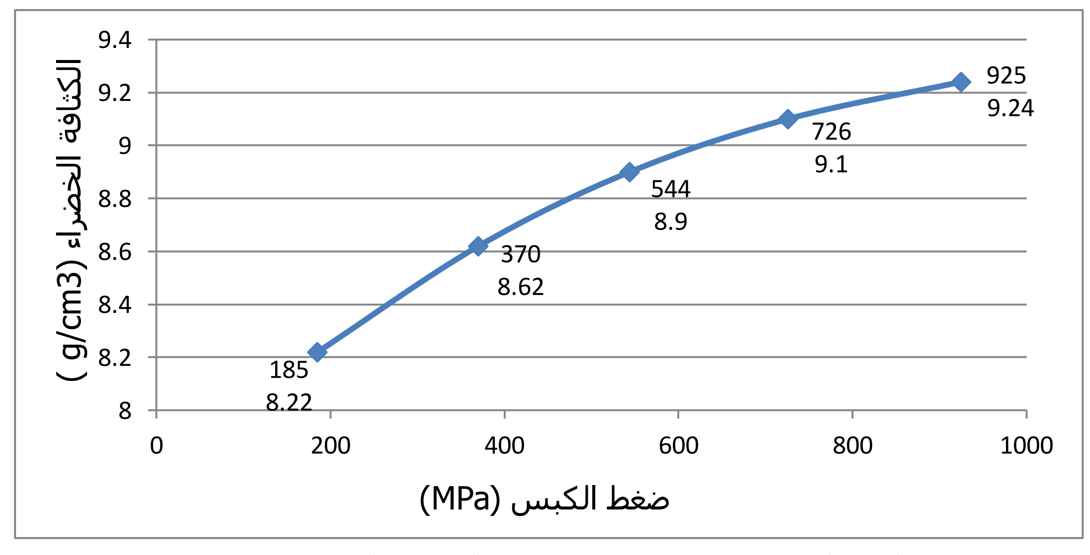
تم في هذه التجربة كبس خمسة عينات كربيدية من عينات اللقم الأولية وذلك عند ضغوط متزايدة تدريجياً لدراسة تغير الكثافة الرطبة (الخضراء) مع الضغط المطبق وتحديد مجال الضغط الأنسب للحصول على أفضل النتائج بعد التلبيد.

يبين الجدول رقم (١٤) نتائج الكثافة الرطبة (الخضراء) والمسامية لهذه العينات.

الجدول رقم (١٤)– نتائج تغير الكثافة الرطبة (الخضراء) مع ضغط الكبس لعينات اللقم الأولية.

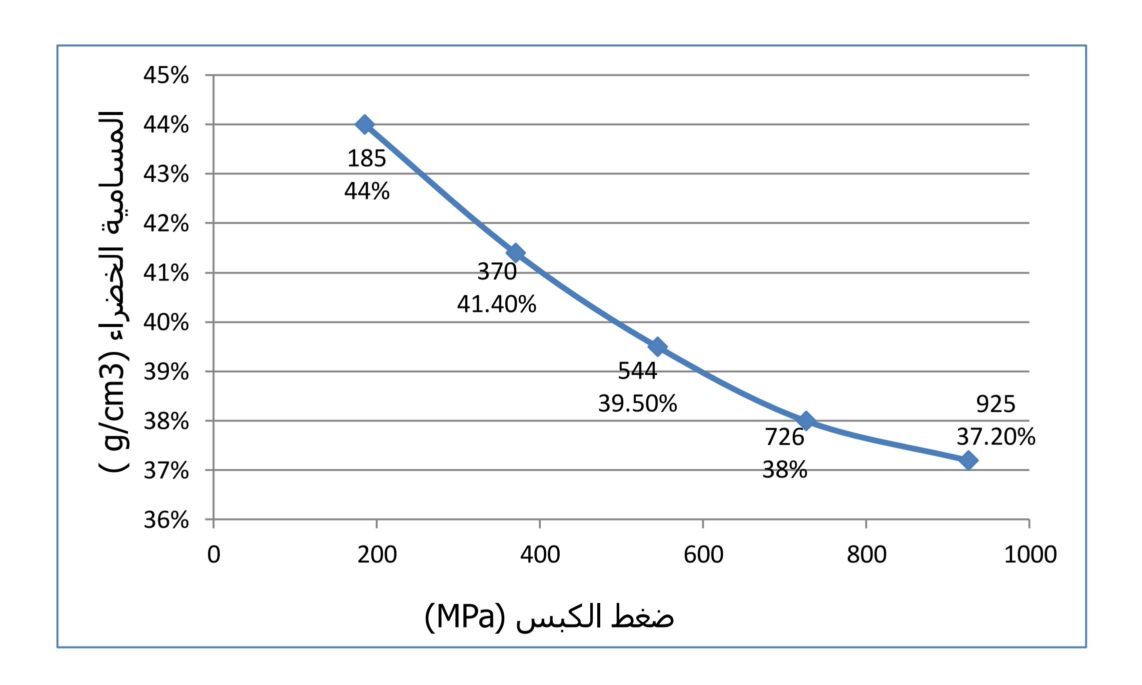
العينات الرطبة (Green part) ذات مقطع دائري مجوف						
رقم العينة		1	2	3	4	5
المادة الأولية		92% كربيد التنغستن – % 8 كوبالت				
قوة الكبس (طن)		5	10	15	20	25
ضغط الكبس (طن/انش^2)		12	24	36	47.5	59.5
ضغط الكبس (Mpa) (S = 270 mm^2)		185	370	544	726	925
الأبعاد قبل التلبيد mm	Ø$_{out}$	20.16	20.16	20.16	20.16	20.16
	Ø$_{in}$	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94
	H	9.4	9.12	8.8	8.55	8.45
الوزن g		19.65	20	19.75	19.94	19.88
الحجم cm^3		2.39	2.32	2.22	2.18	2.15
الكثافة الرطبة (الخضراء) g/cm^3		8.22	8.62	8.9	9.1	9.24
الكثافة النسبية الخضراء %		56	58.6	60.5	62	62.8
المسامية الخضراء (%)		44	41.4	39.5	38	37.2

وبالتمثيل البياني نحصل على العلاقة بين الكثافة الرطبة (الخضراء) وضغط الكبس الشكل (٨١)



الشكل (٨١)– العلاقة بين الكثافة الرطبة (الخضراء) وضغط الكبس لعدة لقم.

ويبين الشكل (٨٢) العلاقة بين المسامية الرطبة (الخضراء) وضغط الكبس.



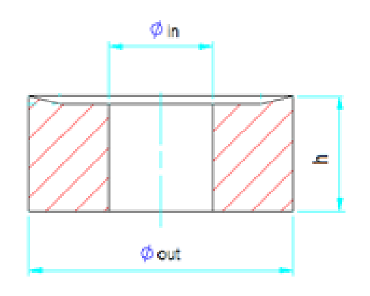
الشكل (٨٢)- العلاقة بين المسامية الرطبة (الخضراء) وضغط الكبس لعدة لقم.

نلاحظ أنه في البداية ومع ازدياد ضغط الكبس تزداد الكثافة الرطبة (الخضراء) بشدة ثم يتضاءل التزايد تدريجياً وكذلك الأمر بالنسبة للمسامية الرطبة (الخضراء) حيث تتناقص بشدة مع ازدياد ضغط الكبس ثم تميل تدريجياً نحو الثبات. ونلاحظ أيضاً أنه لا حاجة لتطبيق ضغوط عالية فوق المجال 600 MPa لأنه كافٍ، كما سنرى لاحقاً، للحصول على قيم كثافة وقساوة جيدة بعد عملية التلبيد إضافة إلى تحاشي اهتراء أجزاء القالب المستخدم في الكبس نتيجة لذلك.

٣-٤ - نتائج قياس الكثافة والمسامية الرطبة (الخضراء) (Green density).

أ- نتائج التجربة رقم (١).

يبين الجدول رقم (١٥) نتائج الكثافة والمسامية للعينات الرطبة (الخضراء) للقم الأولية.

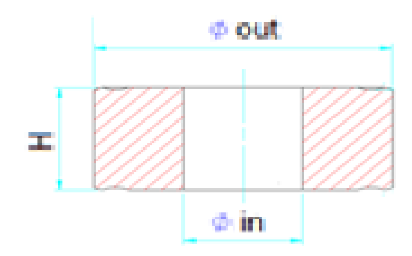


الجدول رقم (١٥)– نتائج الكثافة والمسامية للعينات الخضراء للقم الأولية.

عينات اللقم الرطبة الأولية (Green part) ذات مقطع دائري مجوف						
تركيب الخليطة : 92% كربيد التنغستن – 8 % كوبالت						
الكثافة النظرية للخليطة: $14.7\ g/cm^3$						
مساحة المقطع ($S = 270\ mm^2$)						
مجال قوة الكبس (16) Ton ضغط الكبس (600) Mpa						
رقم العينة	أبعاد العينة قبل التلبيد (mm) $Ø_{out}$, $Ø_{in}$, h	الوزن قبل التلبيد (g)	حجم العينة cm^3	الكثافة الخضراء g/cm3	الكثافة النسبية %	المسامية الخضراء %
1	20.16* 7.95 * 8.05	19.34	2.05	9.43	64.1	35.9
2	20.16* 7.95 * 8.05	19.34	2.05	9.43	64.1	35.9
3	20.16* 7.95 * 7.75	18.5	1.98	9.34	63.5	36.5
4	20.16* 7.95 * 8.14	19.33	2.07	9.34	63.5	36.5
5	20.16* 7.95 * 8.05	19.31	2.06	9.37	63.7	36.3
6	20.16* 7.95 * 7.97	19.21	2.03	9.46	64.3	35.7
7	20.16* 7.99 * 8.03	19.31	2.06	9.37	63.7	36.3
الوسطي				9.39	64	36

ب- نتائج التجربة رقم ٢.

يبين الجدول رقم (١٦) نتائج الكثافة والمسامية للعينات الرطبة (الخضراء) للقم النهائية.

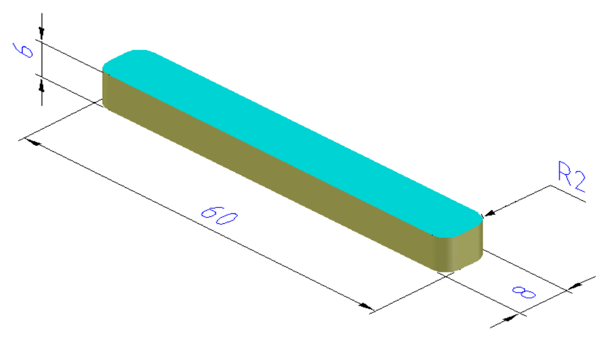


الجدول رقم (١٦)- نتائج الكثافة والمسامية لعينات اللقم الرطبة (الخضراء) النهائية.

عينات اللقم الرطبة النهائية (Green part) ذات مقطع دائري مجوف						
تركيب الخليطة : 92% كربيد التنغستن – 8 % كوبالت						
الكثافة النظرية للخليطة: $14.7\ g/cm^3$						
مساحة المقطع $(S = 223)\ mm^2$						
مجال قوة الكبس (16) Ton ضغط الكبس (600) Mpa						
رقم العينة	أبعاد العينة قبل التلبيد (mm) $Ø_{out}$, $Ø_{in}$, H	الوزن قبل التلبيد (g)	حجم العينة cm^3	الكثافة الخضراء g/cm^3	الكثافة النسبية %	المسامية الخضراء %
1	18.31* 7.17 * 7.6	15.33	1.665	9.20	62.6	37.4
2	18.33* 7.17 *7.55	15.28	1.651	9.25	62.9	37.1
3	18.35 * 7.2 * 7.5	15.3	1.655	9.24	62.8	37.2
4	18.35* 7.2 * 7.58	15.34	1.668	9.19	62.5	37.5
5	18.35* 7.2 * 7.52	15.25	1.645	9.27	63	37
6	18.35* 7.2 * 7.56	15.31	1.659	9.22	62.7	37.3
7	18.35* 7.2 * 7.54	15.35	1.67	9.19	62.5	37.5
الوسطي				9.22	62.7	37.3

ت- نتائج التجربة رقم ٣ (عينات اختبار الانعطاف).

يبين الجدول رقم (١٧) نتائج الكثافة والمسامية للعينات الرطبة (الخضراء) الخاصة باختبار مقاومة عى الانعطاف.



الجدول رقم (١٧)- نتائج الكثافة والمسامية للعينات الخضراء الخاصة باختبار مقاومة الانعطاف.

العينات الكربيدية الرطبة (Green part) الخاصة باختبار متانة الانعطاف مستطيلة المقطع						
تركيب الخليطة : 92% كربيد التنغستن – 8 % كوبالت						
الكثافة النظرية للخليطة: $14.7\ g/cm^3$						
مساحة المقطع $S = 463\ mm^2$						
قوة الكبس (25) Ton ضغط الكبس (550) Mpa						
رقم العينة	أبعاد العينة قبل التلبيد (mm) L x W x H	الوزن قبل التلبيد (g)	حجم العينة cm^3	الكثافة الخضراء g/cm^3	الكثافة الخضراء النسبية %	المسامية الخضراء %
1	60 * 8 * 5.83	24.62	2.8	8.79	59.7	40.3
2	60 * 8 * 5.8	24.96	2.78	8.97	61	39
3	60 * 7.9 * 6.1	24.9	2.891	8.6	58.5	41.5
4	60 * 7.9 * 6.2	24.9	2.938	8.47	57.6	42.4
الوسطي				8.7	59.2	40.8

٣-٥ نتائج قياس الكثافة والمسامية بعد المعالجة الحرارية (التلبيد).

٣-٥-١ نتائج تجربة التلبيد في جو الآزوت.

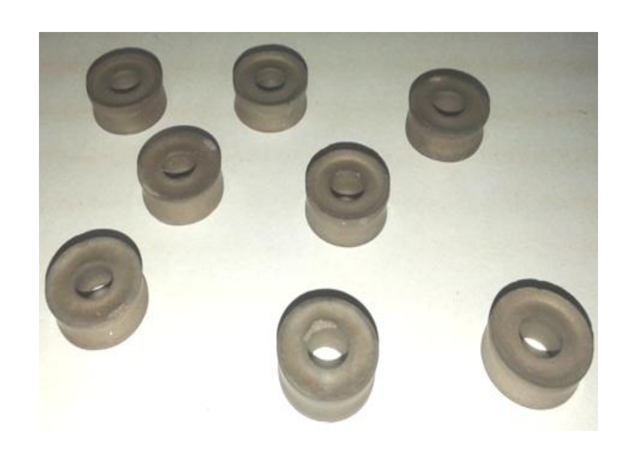
- التلبيد باستخدام فرن ذي أجواء واقية من (N_2) كحماية (Sintering under Nitrogen):
تم في فرن كتيم ضمن غاز الآزوت وعند 1475 °C، ولم تتكلل هذه التجربة بالنجاح وكانت النتائج سيئة حيث تم إخراج بقايا عينات مشوهة من الفرن ومتشققة بدت عليها آثار تشكل النتريدات الصفراء الهشة على السطح، ولم تكن صالحة لإجراء القياسات المخبرية.
يمكن تفسير ذلك بعدم صلاحية غاز النتروجين لاستخدامه كجو حماية لتلبيد الخليطة (كربيد- كوبالت)، حيث أن حرارة التلبيد 1475 °C العالية أدت إلى تنشيط غاز الآزوت وتفاعله مع بعض عناصر خليطة الكربيد- كوبالت وتشكل نتريدات صفراء اللون. وهذا ما أكده الفحص المغناطيسي المباشر للعينات التي لم تنجذب عند تقريبها من المغناطيس، وهذا ما يؤكد فقدان الكوبالت في الخليطة على الرغم من عدم بلوغ درجة حرارة انصهاره (1493 °C).
يبين الشكل (٨٣) العينات الملبدة ضمن جو الآزوت.



الشكل رقم (٨٣)- العينات الملبدة في الفرن الكتيم ضمن جو الآزوت.

٣-٥-٢ نتائج تجربة التلبيد في جو الآرغون.

تمت المعالجة في الفرن الكتيم HT 1600 M عند الدرجة 1475 °C باستخدام غاز الآرغون التجاري كغاز حماية وضبط التدفق عند القيمة 30% على الجهاز المركب على الفرن.
تم إخراج العينات من الفرن ومعاينتها الشكل (٨٤) وكانت النتائج الأولية جيدة من حيث حالة ولون السطح واكتمال حجم العينة، وتم قياس الكثافة والمسامية بعد التلبيد وفق الجدول رقم (١٨).



الشكل (٨٤)- العينات الملبدة في الفرن الكتيم باستخدام غاز الآرغون.

الجدول رقم (١٨)- نتائج الكثافة والمسامية بعد التلبيد للعينات الأولية (1475 °C – غاز Ar).

Sintered Sample at 1475 °C in (Ar) العينات الملبدة عند 1475 °C في فرن غاز الآرغون (مقطع دائري مجوف).						
الكثافة النظرية للخليطة: $14.7\ g/cm^3$						
قوة الكبس Ton (16) ضغط الكبس Mpa (600)						
المسامية بعد التلبيد %	الكثافة النسبية %	الكثافة بعد التلبيد g/cm^3	الحجم بعد التلبيد cm^3	الوزن بعد التلبيد (g)	أبعاد العينة بعد التلبيد (mm) $Ø_{out}$ x $Ø_{in}$ x h	رقم العينة
9.5	90.5	13.3	1.35	17.95	17.35 * 6.75*6.52	1
10.5	89.5	13.16	1.36	17.9	17.4 * 6.81 * 6.5	2
9.7	90.3	13.28	1.31	17.4	17.3 * 6.73 * 6.32	3
11.6	88.4	13	1.38	17.93	17.42 *6.85 *6.63	4
9.8	90.2	13.26	1.35	17.91	17.37 * 6.78*6.51	5
10.2	89.8	13.2	1.35	17.82	17.36 * 6.76*6.47	6
10.7	89.3	13.13	1.36	17.85	17.33 * 6.74*6.60	7
10.3	89.7	13.2	الوسطي			

تبين لدى معاينة وفحص العينات بدقة وجود تشوه على شكل تخصُّر في الوسط وبعض الانتفاخات الطفيفة التي أعاقت قياس أبعادها وحجمها بشكل دقيق. وعند إجراء الفحص المغناطيسي الأولي المباشر للعينات الملبّدة، تبين وجود ضعف في الأثر المغناطيسي المتبقي

وذلك عند تقريب المغناطيس نحوها، وهذا يشير إلى حدوث تأكسد وخسارة جزء مهم لمحتوى الكوبالت في العينات.
نلاحظ في هذه التجربة أن عملية التلبيد قد أدت الى ارتفاع في قيم الكثافة نحو مستوى جيد وكذلك انخفاض في قيم المسامية، لكن ليس الى الحد الذي نطمح الوصول إليه وتحقيق قيم قريبة من الكثافة النظرية للكربيد الملبد وللقمة المرجعية ($14.7\ g.cm^{-3}$).

٣-٥-٣ نتائج تجربة التلبيد في فرن التخلية.

أجريت عملية التلبيد هذه في فرن التخلية عند الدرجة 1300 °C (الحرارة العظمى للفرن) وقيمة ضغط 0.5 Pa ولخمسة عينات من اللقم الكربيدية التي تم كبسها مسبقاً عند ضغوط كبس متدرجة. تم مراقبة التغير في الكثافة والمسامية قبل وبعد التلبيد ومع ازدياد ضغط الكبس تدريجياً. يعطي الجدول (١٩) نتائج هذه التجربة.

الجدول رقم (١٩)- نتائج الكثافة والمسامية للعينات الأولية الملبدة عند (1300 °C- ضغط 0.5 Pa)

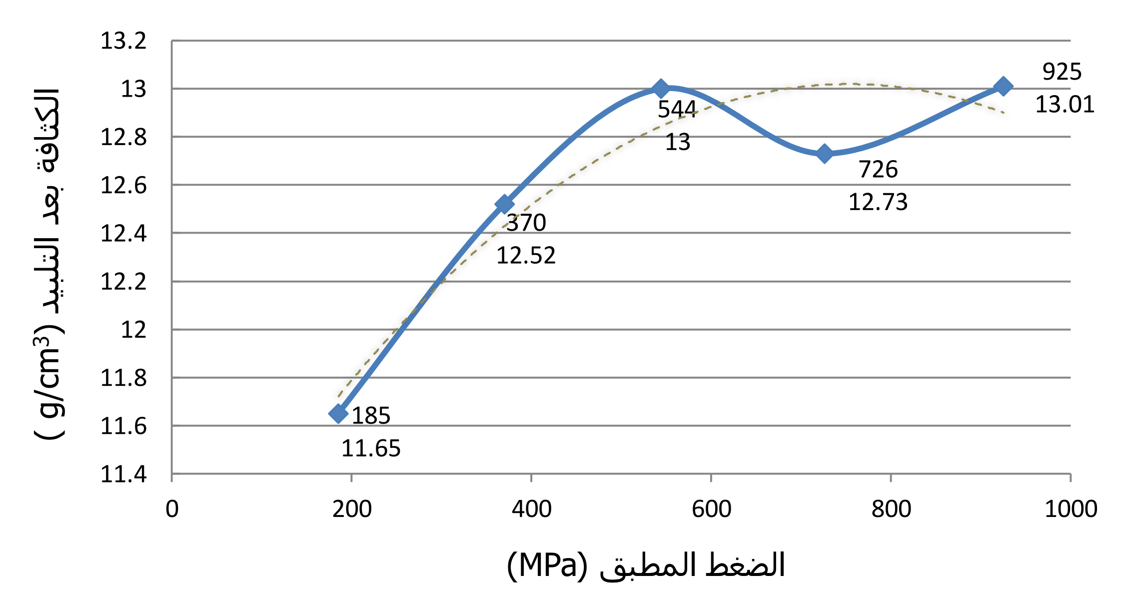
Sintered Sample at 1300C° under 5.10^{-3} mbar (0.5 Pa) العينات الملبدة في فرن التخلية عند 1300 °C وضغط 0.5 Pa.						
رقم العينة		1	2	3	4	5
ضغط الكبس (Mpa) (S = 270 mm^2)		185	370	544	726	925
الأبعاد بعد التلبيد mm	$Ø_{out}$	17.7	17.79	17.45	18.25	17.85
	$Ø_{in}$	7	7	6.9	7.2	7.06
	H	7.8	7.11	7.23	7.12	6.85
الوزن (g)		19.11	19.04	19.25	19.22	19.13
الحجم (cm^3)		1.64	1.52	1.48	1.51	1.47
الكثافة بعد التلبيد g/cm^3		11.65	12.52	13	12.73	13.01
الكثافة النسبية %		79.2	85	88.4	86.6	88.5
المسامية (%)		20.8	15	11.6	13.4	11.5
القساوة HRC		56 - 48	64 – 55	65 – 60	59 – 54	61 – 57

يلاحظ من الجدول (١٩) عدم بلوغ مستوى الكثافة النظرية لعينات الكربيد الملبّدة في الخلاء، وهي $14.7\ g.cm^{-3}$. ويمكن عزو هذا الأمر إلى عدم التمكن من بلوغ حرارة التلبيد العظمى المطلوبة لهذه الخليطة (1475 °C) بسبب كون الحرارة العظمى المتاحة لفرن التخلية المستخدم 1300 °C فقط. يشير الفحص المغناطيسي لهذه العينات أنها قابلة للمغنطة مما يدل على ثبات محتوى الكوبالت ضمنها– الشكل رقم (٨٥).



الشكل رقم (٨٥)– عينات اللقم الأولية الملبدة ضمن فرن التخلية عند 1300 °C.

يلاحظ أيضاً أن زيادة الكثافة بعد التلبيد مع زيادة ضغط الكبس المطبق عند تشكيل العينات الخضراء فوق القيمة (600 MPa) هو أمر غير مجدي كما هو موضح في الشكل (٨٦).



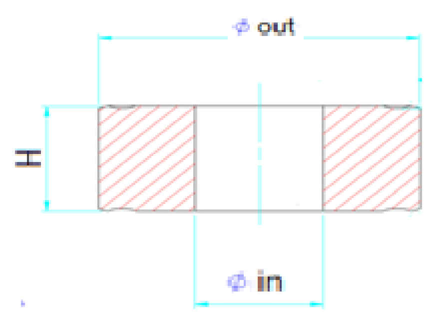
الشكل (٨٦)– العلاقة بين الكثافة النهائية بعد التلبيد (1300 °C) وضغط الكبس لعدة لقم.

٣-٥-٤ نتائج تجربة التلبيد على مرحلتين (Double Stage Sintering).

أ- نتائج تجربة التلبيد على مرحلتين لعينات اللقم الكربيدية.

يعطي الجدول رقم (٢٠) نتائج الكثافة والمسامية للقطع الملبدة على مرحلتين (في فرن التخلية Fulgura ECM 1350 °C ثم بواسطة حاوية غرافيتية ضمن مسحوق خامل عند 1475 °C).

بينت قيم الكثافة والمسامية أنها قريبة من القيم النظرية للكربيد الملبد.



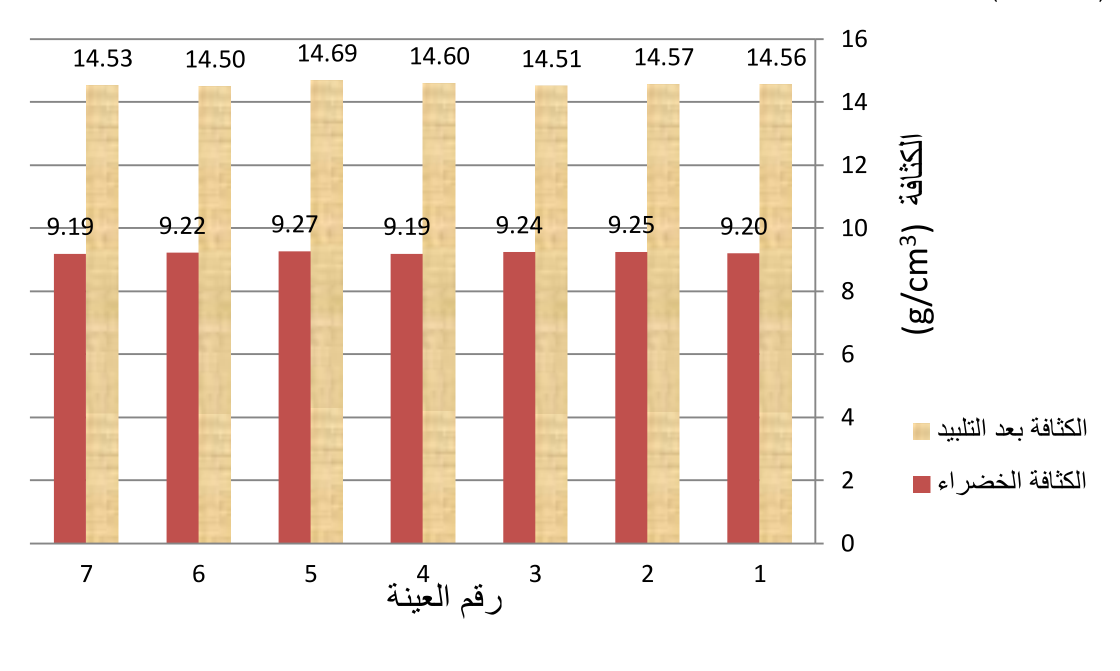
الجدول رقم (٢٠) – نتائج الكثافة والمسامية للعينات الملبدة (على مرحلتين).

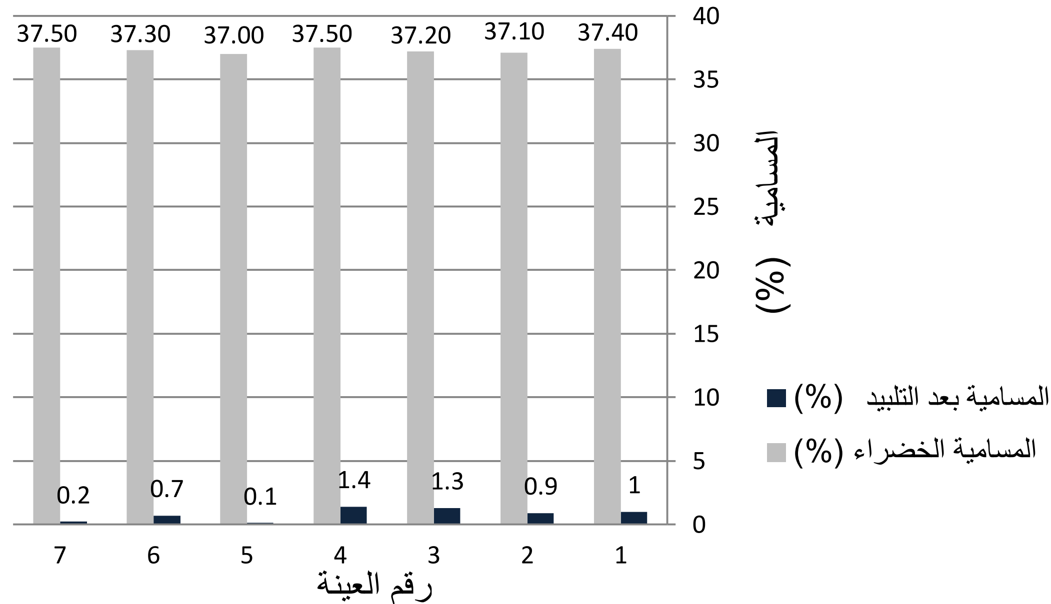
عينات اللقم الملبدة على مرحلتين (Double Stage Sintering) (فرن التخلية 1300°C ثم في الفرن الكتيم عند 1475 °C ضمن حاوية غرافيتية ومسحوق MgO)								
رقم العينة		1	2	3	4	5	6	7
ضغط الكبس	(طن/انش[٢]) MPa	43.5 600						
الأبعاد بعد التلبيد mm	$\varnothing_{out}$	6.28	6.25	6.3	6.35	6.33	6.32	6.25
	$\varnothing_{in}$	15.77	15.75	15.78	15.76	15.75	15.8	15.75
	H	6.43	6.45	6.45	6.55	6.25	6.45	6.5
الوزن g		14.82	14.77	14.8	14.89	14.53	14.79	14.75
الحجم cm^3		1.018	1.014	1.02	1.02	0.989	1.02	1.015
الكثافة بعد التلبيد g/cm^3		14.56	14.57	14.51	14.6	14.69	14.5	14.53
الكثافة النسبية %		99	99.1	98.7	98.6	99.9	99.3	99.8
المسامية %		1	0.9	1.3	1.4	0.1	0.7	0.2

أعطى الفحص الأولي المباشر وجود أثر مغناطيسي قوي لانجذاب العينات نحو المغناطيس عند تقريبه منها مما يدل على ثبات محتوى الكوبالت في القطع الملبدة.

كانت نتائج الكثافة والمسامية مثالية في هذه التجربة حيث ارتفعت قيم الكثافة وانخفضت المسامية بعد التلبيد بشكل ملموس حيث اقتربت من القيمة النظرية للكربيد الملبد. وقد تمت عمليات التلبيد اللاحقة على عينات الاختبار الميكانيكية في نفس شروط هذه التجربة.

تعطي المخططات البيانية في الشكل رقم (٨٧) مقارنة بين قيم الكثافة والمسامية الرطبة (الخضراء) والكثافة والمسامية بعد التلبيد.





الشكل رقم (٨٧)– المقارنة بين قيم الكثافة والمسامية الخضراء والكثافة والمسامية بعد التلبيد.

نلاحظ الفرق الشاسع في المسامية قبل وبعد التلبيد وهو ما يميز التلبيد في الطور السائل.

ب- نتائج تجربة التلبيد على مرحلتين لعينات الانعطاف.

يعطي الجدول رقم (٢١) نتائج الكثافة والمسامية لعينات اختبار الانعطاف الكربيدية بعد التلبيد على مرحلتين.

الجدول (٢١)- نتائج الكثافة والمسامية لعينات اختبار مقاومة الانعطاف بعد التلبيد.

عينات اختبار الانحناء الملبدة Sintered Test Sample 1475 °C				
رقم العينة	١	٢	٣	٤
رمز الخليطة	92% كربيد التنغستن – % 8 كوبالت			
ضغط الكبس (MPa)	550			
الطول (مم)	51.7	51.5	51.2	51.5
العرض (مم)	6.78	6.75	6.85	6.72
الارتفاع (مم)	4.9	4.86	5.1	4.9
الوزن g	24.18	23.87	23.9	23.91
الحجم cm^3	1.657	1.625	1.636	1.635
الكثافة الحقيقية g/cm^3	14.59	14.69	14.6	14.62
الكثافة النظرية (WC 92% + CO 8%) g/cm^3	$\rho_{th} = \frac{1}{\frac{0.92}{15.6}+\frac{0.08}{8.9}} = 14.7$			
الكثافة النسبية %	99.2	99.9	99.3	99.4
المسامية النسبية %	0.8	0.1	0.7	0.6

٣-٦ نتائج الانكماش.

ترافقت تجارب عمليات التلبيد في أجواء مختلفة (آرغون- خلاء – ضمن مسحوق خامل) وفي مختلف أشكال العينات مع حدوث نقص في الحجم وفقدان في الوزن. تكتسب هذه التغيرات في الأبعاد أهمية بالغة عند حسابات كمية المواد المسحوقية وإعداد الخلطات وكذلك اعتبارات تصميم القوالب. ينجم الفقد في الوزن عن إضافة كمية من الرابط العضوي والمادة المزلقة الى خلطة المساحيق لاكسابها المتانة الخضراء وتسهيل عملية الكبس وعن احتراقها خلال مراحل التلبيد، أما الانكماش الحجمي، فهو ينتج عن زوال المسامات والفجوات عند حدوث التكثيف.

يبين الجدول (٢٢) القياسات والحسابات لتحديد هذه الانكماشات.

الجدول (٢٢) نتائج الانكماش لعينات اللقم الأولية الملبدة في الفرن الكتيم (جو أرغون)

Sintered Sample at 1475 °C in (Ar) العينات ذات مقطع دائري مجوف ملبدة عند 1475 °C في فرن غاز الآرغون								
7	6	5	4	3	2	1		رقم العينة
600								ضغط الكبس (Mpa) (mm^2 S = 270)
7.99	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	$Ø_{in}$	الأبعاد قبل التلبيد mm
20.16	20.16	20.16	20.16	20.16	20.16	20.16	$Ø_{out}$	
7.57	7.45	7.54	7.57	7.19	7.52	7.53	H	
6.74	6.76	6.78	6.85	6.73	6.81	6.75	$Ø_{in}$	الأبعاد بعد التلبيد mm
17.33	17.36	17.37	17.42	17.30	17.40	17.35	$Ø_{out}$	
6.60	6.47	6.51	6.63	6.32	6.5	6.52	H	
17	16.5	16	15	16.5	15.6	16		نسبة الانكماش الخطي%
2.06	2.03	2.06	2.07	1.98	2.05	2.05		الحجم قبل التلبيد cm^3
1.36	1.35	1.35	1.38	1.31	1.36	1.35		الحجم بعد التلبيد cm^3
34	33.5	34	33	34	33	34		نسبة الانكماش الحجمي%
19.31	19.21	19.31	19.33	18.5	19.34	19.34		الوزن قبل التلبيد g
17.85	17.82	17.91	17.93	17.4	17.9	17.95		الوزن بعد التلبيد g
7.5	7	7.2	7.2	5.9	7.4	7.1		نسبة الفقد الوزني %

16	متوسط نسبة الانكماش الخطي %
33.5	متوسط نسبة الانكماش الحجمي %
7	متوسط نسبة الفقد الوزني %

يبين الجدول(٢٣) نتائج الانكماشات لعينات اللقم الملبدة على مرحلتين Double Stage Sintering (فرن التخلية 1300 °C + الفرن الكتيم 1470 °C ضمن حاوية غرافيتية ومسحوق خامل MgO)

الجدول (٢٣)- نتائج الانكماشات لعينات اللقم النهائية الملبدة على مرحلتين.

عينات اللقم الملبدة على مرحلتين (Double Stage Sintering) (فرن التخلية 1300 °C والفرن الكتيم عند 1470 °C ضمن حاوية غرافيتية ومسحوق MgO)								
رقم العينة		1	2	3	4	5	6	7
ضغط الكبس MPa (S = 223) mm^2		660						
الأبعاد قبل التلبيد mm	$Ø_{in}$	7.17	7.17	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
	$Ø_{out}$	18.31	18.33	18.35	18.35	18.35	18.35	18.35
	H	7.6	7.55	7.5	7.58	7.52	7.56	7.54
الأبعاد بعد التلبيد mm	$Ø_{in}$	6.28	6.25	6.3	6.35	6.33	6.32	6.25
	$Ø_{out}$	15.77	15.75	15.78	15.76	15.75	15.8	15.75
	H	6.43	6.45	6.45	6.55	6.25	6.45	6.5
نسبة الانكماش الخطي%		17	16	16.5	15.5	17	16.5	16.5
الحجم قبل التلبيد cm^3		1.665	1.651	1.655	1.668	1.645	1.659	1.67
الحجم بعد التلبيد cm^3		1.018	1.014	1.02	1.02	0.989	1.02	1.015
نسبة الانكماش الحجمي%		38.8	38.5	38.3	38.8	39.87	38.5	39.2
الوزن قبل التلبيد g		15.33	15.28	15.3	15.34	15.25	15.31	15.35
الوزن بعد التلبيد g		14.82	14.77	14.8	14.89	14.53	14.79	14.75
نسبة الفقد الوزني %		3.3	3.3	3.26	3.6	4.7	3	3.9

متوسط نسبة الانكماش الخطي %	16.4
متوسط نسبة الانكماش الحجمي %	38.8
متوسط نسبة الفقد الوزني %	3.6

٣-٧ نتائج الاختبارات الميكانيكية.

٣-٧-١ نتائج اختبار القساوة والمقارنة مع اللقمة المرجعية.

تم اختبار القساوة بعد عمليات التلبيد وذلك لمختلف عينات اللقم الأولية واللقم النهائية وعينات اختبار مقاومة الانعطاف. يعطي الجدولان رقم (٢٤ و ٢٥) نتائج اختبار القساوة.

الجدول رقم (٢٤)- نتائج القساوة الماكروية لعينات اللقم الملبدة الأولية.

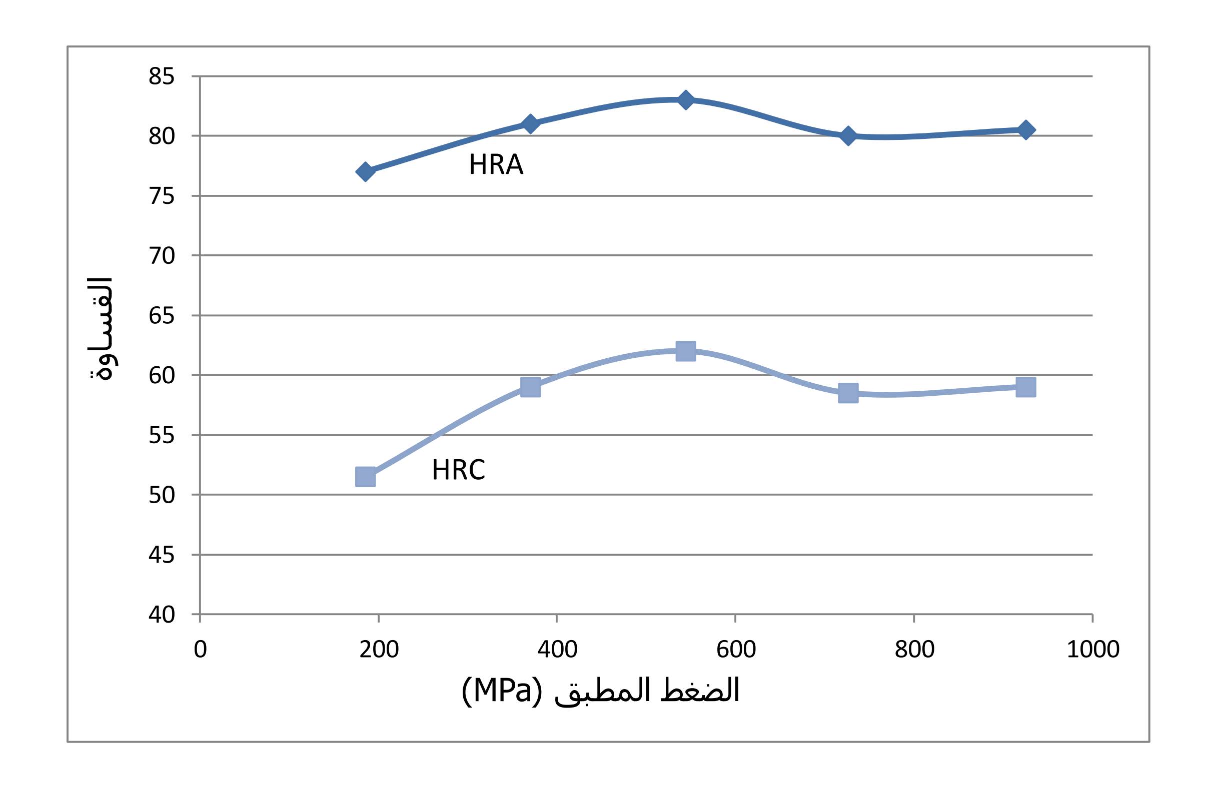
نتائج القساوة لعينات اللقم الأولية								
	Sintered Sample at 1475 °C With Ar العينات الملبدة عند 1475 °C في غازِ الآرغون كحماية							**الوسطي**
رقم العينة		1	2	3	4	5	6	7
جو التلبيد		غاز الآرغون						
ضغط الكبس(طن/انش٢) (Mpa)		42 600						
القساوة	HRA	80	78	79	75	78	77	76	**77.5**
	HRC	59	53	56	50	54	52.5	51	**53.6**
	HV30	675	556	608	508	565	551	527	**570**

الجدول رقم (٢٥)- نتائج القساوة لعينات اللقم الملبدة في فرن التخلية عند ضغوط كبس مختلفة.

نتائج قساوة عينات اللقم تبعاً لتغير ضغط الكبس							
		Sintered Sample at 1300 °C under Vacuum العينات الملبدة عند 1300 °C في فرن التخلية.					**الوسطي**
رقم العينة		1	2	3	4	5	
جو التلبيد		Vacuum – 0.5 Pa					
قوة الكبس (طن)		5	10	15	20	25	
ضغط الكبس (Mpa)		185	370	544	726	925	
القساوة	HRA	77	81	83	80	80.5	**80.3**
	HRC	51.5	59	62	58.5	59	**58**
	HV30	535	685	760	659	679	**663.6**

يلاحظ من الجدول (٢٥) عدم بلوغ مستوى القساوة النظرية أي HRC 72-70 من اجل عينات الكربيد الملبّدة في الخلاء فقط. ويمكن عزو هذا الأمر إلى عدم التمكن من بلوغ درجة حرارة التلبيد العظمى المطلوبة لهذه الخليطة (1475 °C) بسبب كون الحرارة العظمى المتاحة لفرن التخلية المستخدم 1300 °C فقط. يشير الفحص المغناطيسي لهذه العينات أنها قابلة للمغنطة مما يدل على ثبات محتوى الكوبالت ضمنها- الشكل رقم (٨٥).

يبين الشكل رقم (٨٨) تغير القساوة بعد التلبيد مع تغير ضغط الكبس المطبق على مختلف العينات المشكلة. يلاحظ أن القساوة بعد التلبيد تتزايد مع زيادة الضغط المطبق حتى القيمة 600 MPa ثم تستقر بعد ذلك.



الشكل رقم (٨٨)- تغير القساوة بعد التلبيد مع تغير ضغط الكبس المطبق على مختلف العينات.

يعطي الجدول رقم (٢٦) نتائج القساوة لعينات اللقم النهائية الملبدة على مرحلتين.

الجدول رقم (٢٦)- نتائج القساوة لعينات اللقم النهائية الملبدة على مرحلتين.

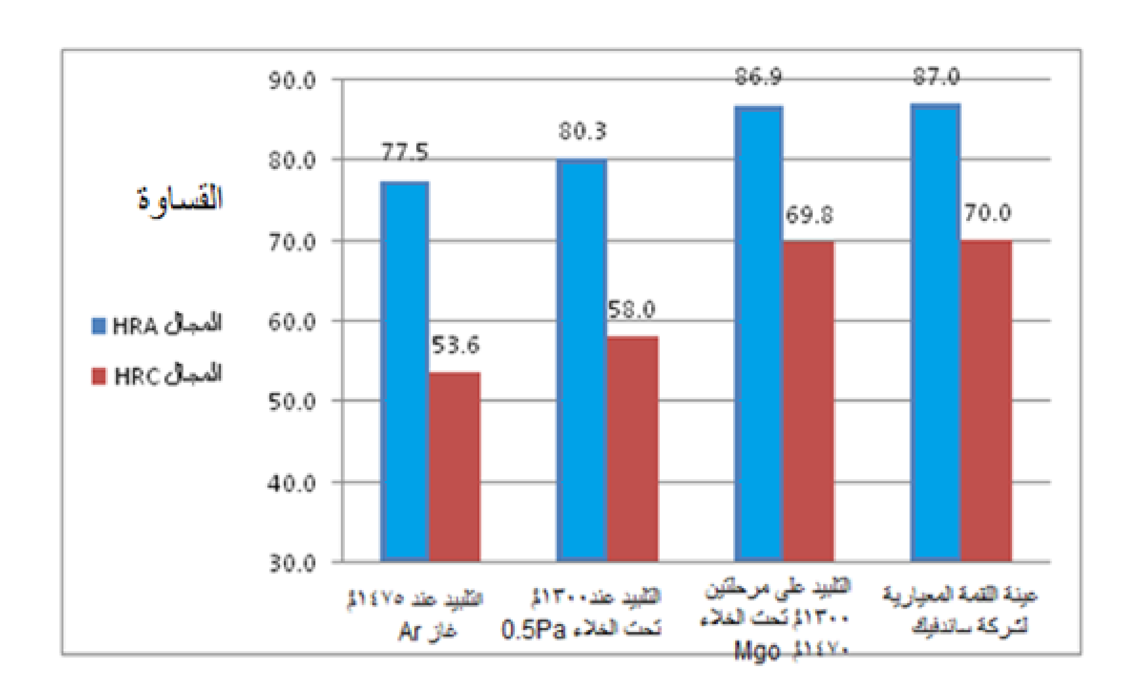
الوسطي	نتائج قساوة عينات اللقم النهائية								
	Sintered Sample 1300 °C under Vacuum +1475 °C inert powder العينات الملبدة عند 1300 °C في فرن التخلية + 1475 °C في مسحوق (MgO)								
	7	6	5	4	3	2	1	رقم العينة	
	600							ضغط الكبس (Mpa)	
85.94	84	86	88.5	83	83.5	88.6	88	HRA	القساوة
67.7	65	69.5	71	63.5	64	71	70	HRC	
979	832	1040	1160	785	800	1160	1076	HV30	

يعطي الجدول رقم (٢٧) نتائج القساوة لعينات اختبار مقاومة الانعطاف الملبدة على مرحلتين.

الجدول رقم (٢٧)- نتائج القساوة لعينات اختبار مقاومة الانعطاف الملبدة على مرحلتين.

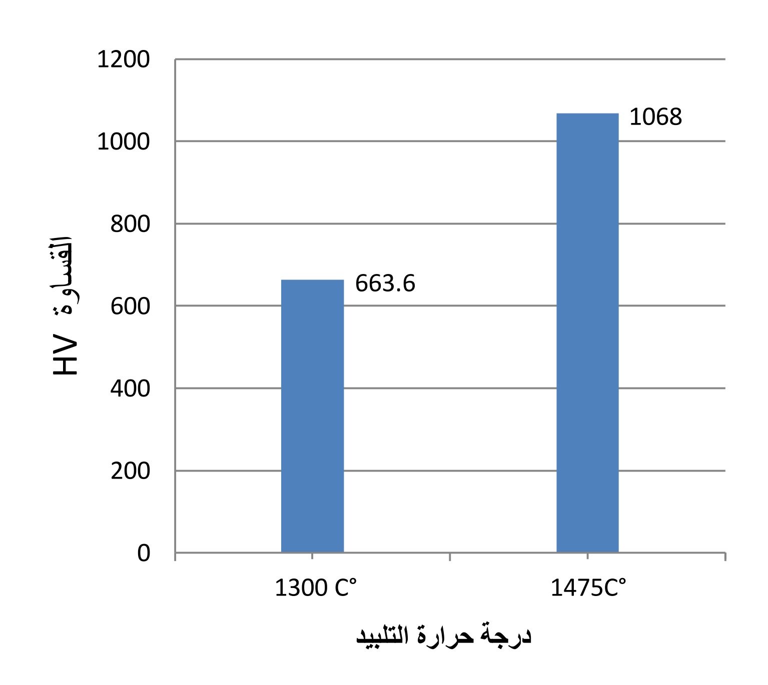
الوسطي	نتائج قساوة عينات اختبار مقاومة الانعطاف.					
	Sintered Sample 1300 °C under Vacuum + 1475 °C inert powder العينات الملبدة عند 1300 °C في فرن التخلية + 1475 °C ضمن مسحوق (MgO)					
	4	3	2	1	رقم العينة	
	550				ضغط الكبس (Mpa)	
86.9	88	85.5	88.5	85.5	HRA	القساوة
69.8	70	69	71	69.2	HRC	
1068	1076	1004	1162	1031	HV30	

يبين الشكل رقم (٨٩) تزايد متوسط القساوة مع تغير شروط جو فرن التلبيد لمختلف التجارب الثلاثة المنفذة ومقارنتها مع قساوة اللقمة الكربيدية المرجعية لشركة Sandvik.



الشكل رقم (٨٩)– تغير متوسط القساوة مع تغير شروط جو فرن التلبيد لمختلف التجارب.

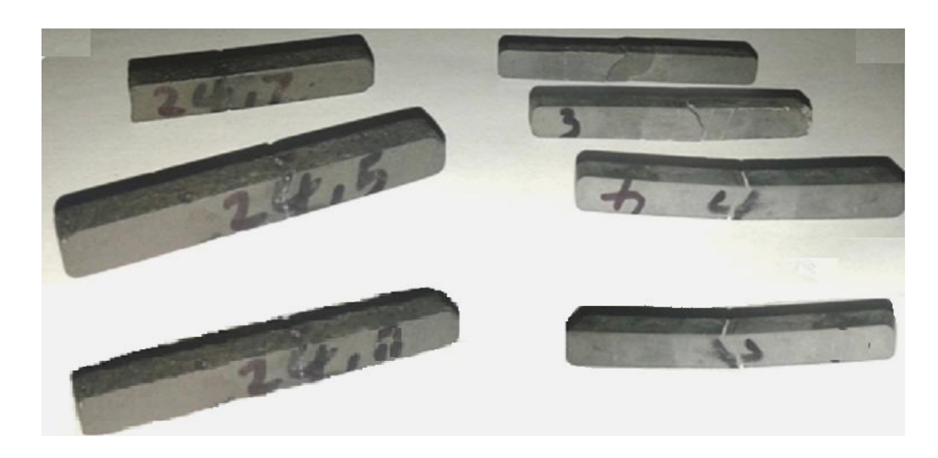
يبين الشكل رقم (٩٠) تغير متوسط القساوة– فيكرز مع ارتفاع درجة حرارة التلبيد.



الشكل رقم (٩٠)– تغير متوسط القساوة– فيكرز مع ارتفاع درجة حرارة التلبيد.

٣-٧-٢ نتائج اختبار مقاومة الانعطاف.

يظهر الشكل رقم (٩١) عينات اختبار مقاومة الانعطاف الموشورية الرطبة والملبدة بعد التحطم.



الشكل رقم (٩١)- عينات اختبار مقاومة الانعطاف الموشورية الرطبة (يسار) والملبدة بعد التحطم.

٣-٧-٢-١ نتائج اختبار مقاومة الانعطاف للعينات الرطبة (الخضراء).

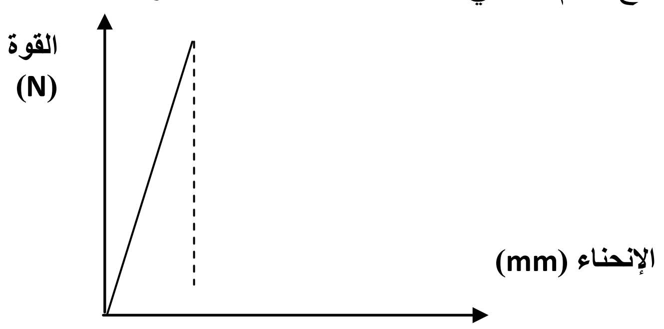
يعطي الجدول رقم (٢٨) ملخص نتائج اختبار مقاومة الانعطاف (٣ نقاط) الرطبة (الخضراء) لعينات موشورية.

الجدول رقم (٢٨)- نتائج اختبار مقاومة الانعطاف للعينات الرطبة (الخضراء) الموشورية.

<table>
<tr><td colspan="6">عينات اختبار مقاومة الانعطاف الرطبة (الخضراء) (Green test samples)</td></tr>
<tr><td colspan="2">رقم العينة</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr>
<tr><td colspan="2">ضغط الكبس (Mpa)
(سطح العينة S = 463 mm^2)</td><td colspan="4">600</td></tr>
<tr><td rowspan="3">الأبعاد
(مم)</td><td>البعد بين المسندين L</td><td>40</td><td>40</td><td>40</td><td>40</td></tr>
<tr><td>العرض W</td><td>8</td><td>8</td><td>7.9</td><td>7.9</td></tr>
<tr><td>السماكة t</td><td>5.83</td><td>5.8</td><td>6.1</td><td>6.2</td></tr>
<tr><td colspan="2">حمل التحطم P_{max} (N)</td><td>26</td><td>34</td><td>39</td><td>42</td></tr>
<tr><td colspan="2">مقاومة الانعطاف الرطبة (الخضراء) MPa</td><td>5.74</td><td>7.58</td><td>7.96</td><td>8.29</td></tr>
<tr><td colspan="2">الانحناء Y (mm)</td><td>1.049</td><td>1.03</td><td>1.12</td><td>0.995</td></tr>
</table>

٣-٧-٢-٢ نتائج اختبار مقاومة الانعطاف للعينات الملبدة.

يبين الشكل رقم (٩٢) النموذج العام لمنحني القوة– انحناء لعينات اختبار الانعطاف الكربيدية الملبدة.



الشكل رقم (٩٢) النموذج العام لمنحني القوة– انحناء لعينات اختبار الانعطاف الكربيدية الملبدة.

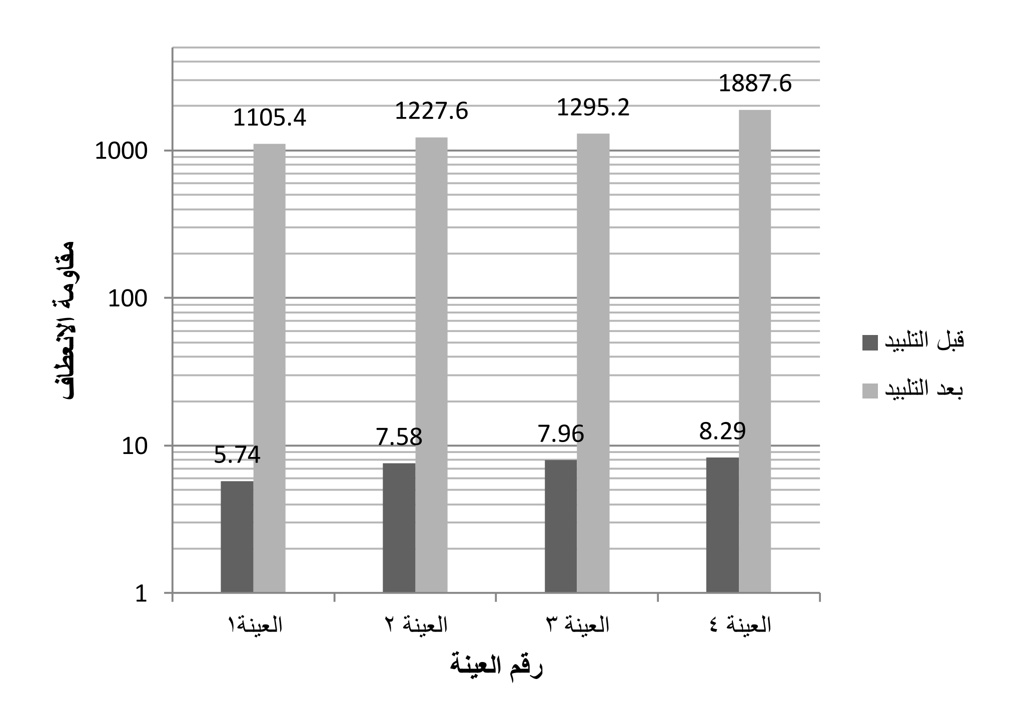
يبين الشكل رقم (٩٢) أن منحنيات القوة – انحناء أو (إجهاد– تشوه) لعينات اختبار الانعطاف الكربيدية الملبدة الأربعة متشابهة تماماً من حيث الشكل، وهذا يعكس تجانساً في البنية والتركيب وشروط التحضير. من جهة أخرى، يشير شكل منحني القوة – انحناء لعينات اختبار الانعطاف الكربيدية الملبدة إلى سلوك خطي مرن وقصف للعينات الأربعة، وهذا ما ينسجم مع السلوك العام للمواد الكربيدية– المعدنية المركبة.

يعرض الجدول رقم (٢٩) نتائج اختبار مقاومة الانعطاف (٣ نقاط) للعينات الموشورية بعد التلبيد.

الجدول رقم (٢٩)– نتائج اختبار مقاومة الانعطاف للعينات الموشورية الملبدة.

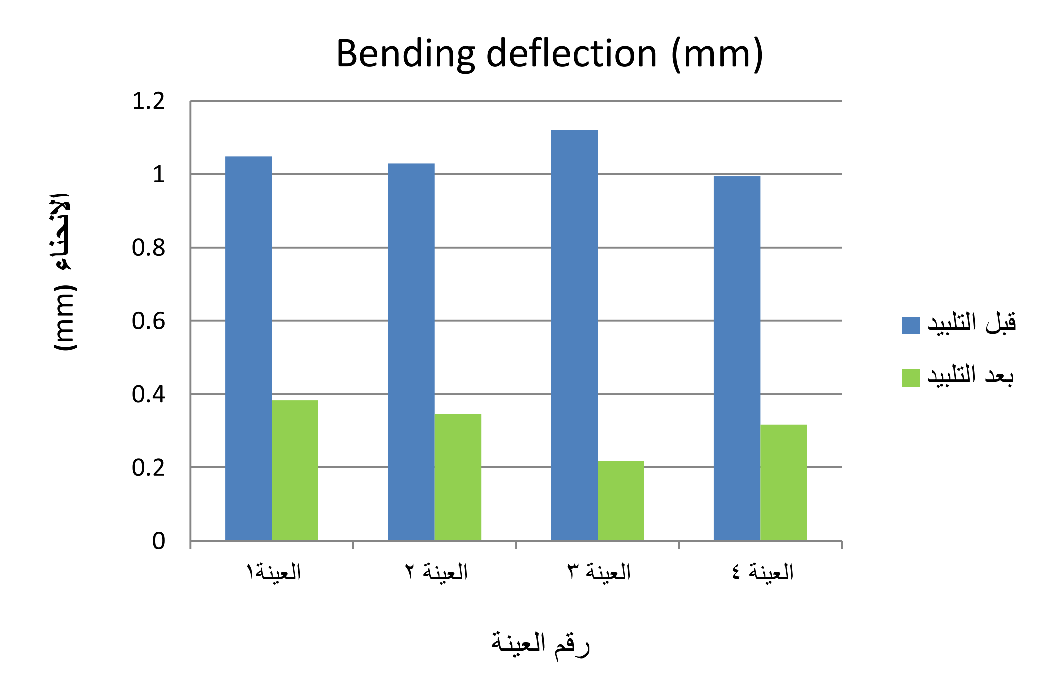
عينات اختبار الانعطاف الملبدة عند 1475 °C (Sintered test Sample)					
رقم العينة		عينة ١	عينة ٢	عينة ٣	عينة ٤
ضغط الكبس (Mpa) (S = 463 mm^2)		600			
الأبعاد (مم)	البعد بين المسندين L	40	40	40	40
	العرض W	6.78	6.75	6.85	6.72
	السماكة t	4.9	4.86	5.1	4.9
الحمل الأعظمي P_{max} (N)		3000	3262	1923	2466
مقاومة الانعطاف MPa		1105.4	1227.6	1295.2	1887.6
الانحناء Y (mm)		0.383	0.347	0.218	0.316
الميل (N/mm)		9655.5	9746.1	9187.8	9430.0
معامل يونغ E_b (GPa)		193.7	201.3	161.8	199.3

يبين التمثيل البياني في الشكل رقم (٩٣) مقارنة قيم مقاومة الانعطاف في العينات المختبرة قبل وبعد التلبيد.



الشكل (٩٣) مقارنة بين قيم مقاومة الانعطاف للعينات المختبرة قبل التلبيد وبعده.

ويبين الشكل رقم (٩٤) مقدار الانحناء في عينات الانعطاف قبل التلبيد وبعده.

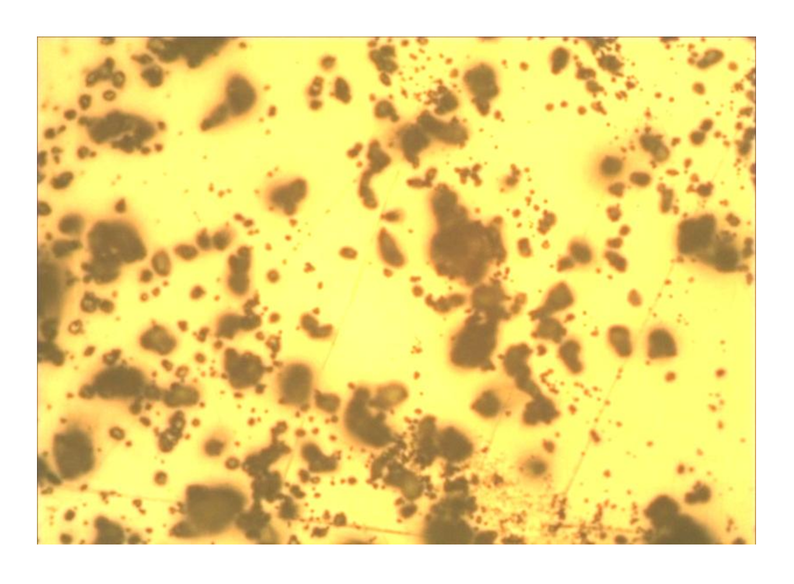


الشكل (٩٤)– مقارنة قيم الانحناء النهائي في عينات الانعطاف قبل التلبيد وبعده.

٣-٨ نتائج الفحص المجهري والمقارنة مع اللقمة المرجعية.

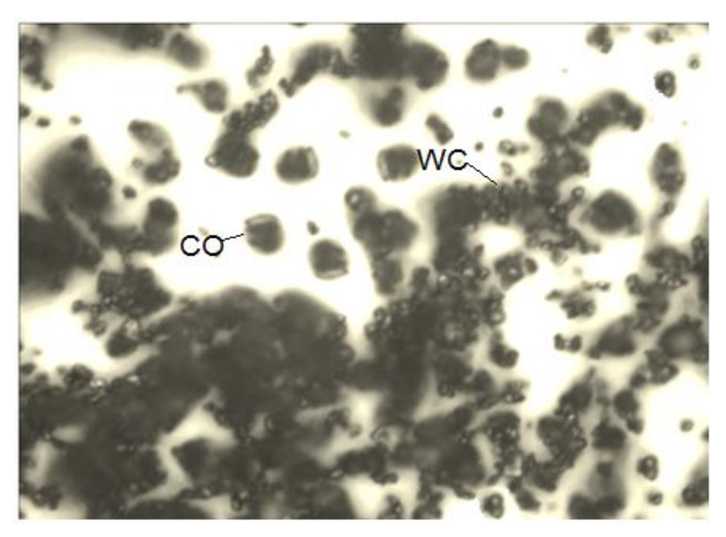
٣-٨-١ نتائج الفحص المجهري لمسحوق خليطة الكربيد.

يبين الشكل رقم (٩٥) صورة لمسحوق خليطة الكربيد (كربيد التنغستن ٩٢% والكوبالت ٨%) بواسطة المجهر الضوئي- تكبير (500X).



الشكل رقم (٩٥)- مسحوق خليطة الكربيد (Co 8% - 92% WC)- تكبير 500X.

ويبين الشكل رقم (٩٦) صورة لمسحوق خليطة الكربيد (كربيد التنغستن ٩٢% والكوبالت ٨%) بواسطة المجهر الضوئي- تكبير (1000X).



الشكل رقم (٩٦)- مسحوق خليطة الكربيد (Co 8% - 92% WC) تكبير 1000X.

نلاحظ أن شكل حبيبات المسحوق الكربيدي شبه كروية وتمثل الحبيبات الكبيرة الكوبالت بينما الحبيبات الصغيرة هي لكربيد التنغستن.

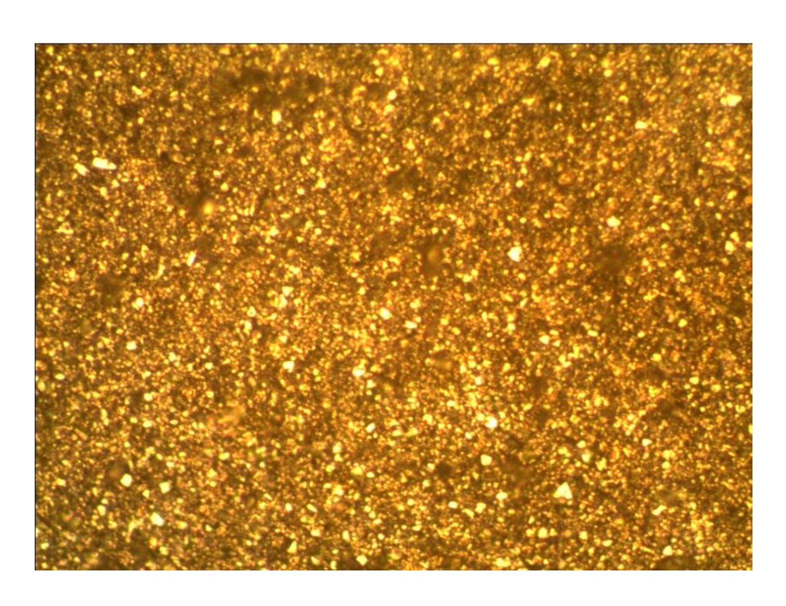
٣-٨-٢ الفحص المجهري للمضغوطات الرطبة (الخضراء).

يبين الشكل رقم (٩٧) صورة مجهرية- تكبير 100X تظهر بنية إحدى عينات اللقم الرطبة (الخضراء) بعد الكبس مباشرة.



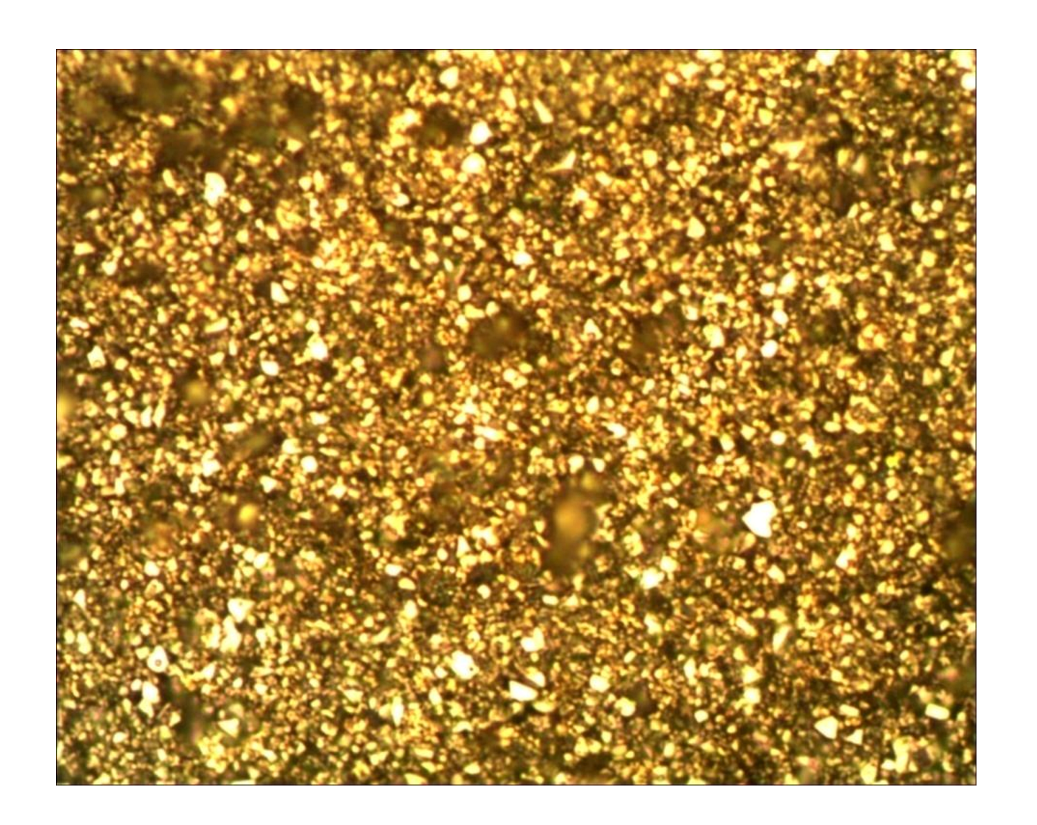
الشكل رقم (٩٧)- صورة مجهرية- تكبير 100X لعينة لقمة رطبة (خضراء) بعد الكبس مباشرة.

ويبين الشكل رقم (٩٨) صورة مجهرية- تكبير 500X لنفس العينة.



الشكل رقم (٩٨)- صورة مجهرية- تكبير 500X لعينة لقمة رطبة (خضراء) بعد الكبس مباشرة.

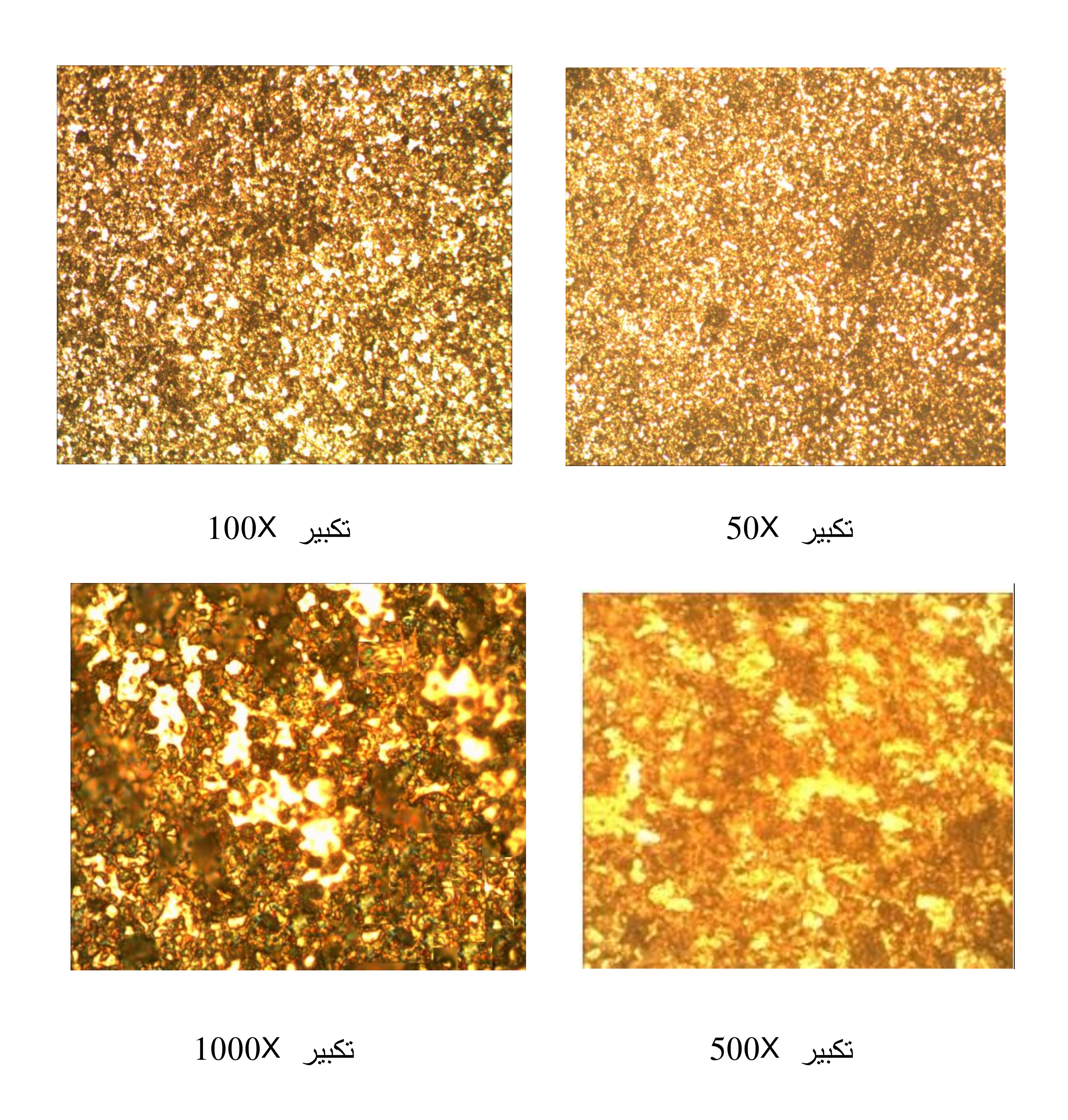
ويبين الشكل رقم (٩٩) صورة مجهرية- تكبير 1000X لنفس العينة حيث تظهر حبيبات WC باللون الابيض والكوبالت باللون الرمادي أما المسامات، فهي باللون الأسود.



الشكل رقم (٩٩) – صورة مجهرية- تكبير 1000X لعينة لقمة رطبة (خضراء) بعد الكبس مباشرة.

٣-٨-٣ الفحص المجهري للعينات الملبدة.

تظهر الصور في الشكل (١٠٠) بنية عينات الكربيد (WC– CO) الملبدة دون معالجة كيميائية سطحية (تنميش) وبتكبير متدرج.

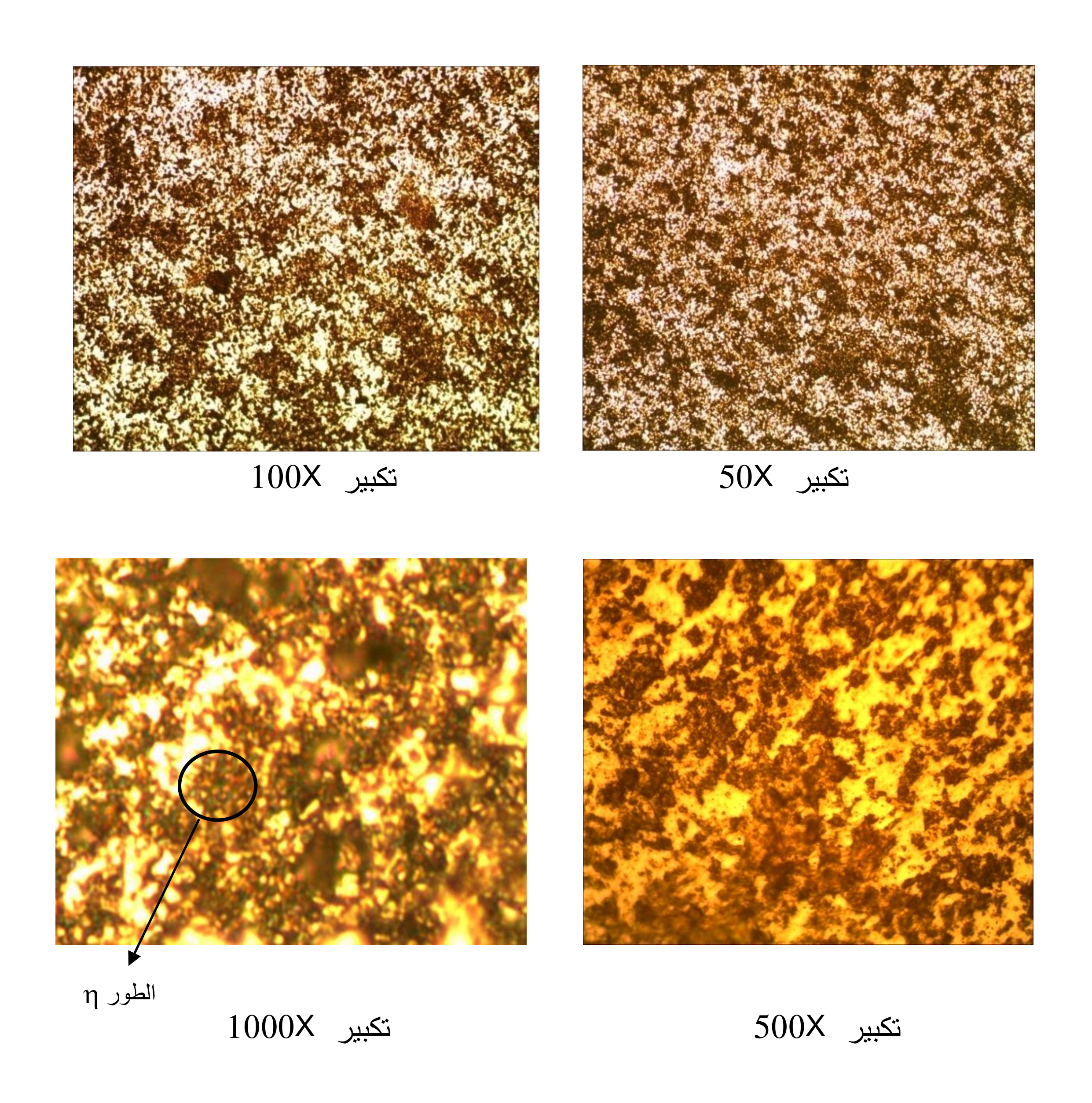


الشكل رقم (١٠٠)– صور مجهرية لعينات الكربيد WC–CO بعد التلبيد دون تنميش.

بعد جلخ وصقل وتلميع سطح العينات الملبدة (على مرحلتين) تم التنميش بمحلول كلور الحديد بعد تحضيره مباشرة (3g $FeC1_3$, 100 mL H_2O).

وتظهر الصور في الشكل (١٠١) بنية عينات الكربيد (WC–CO) الملبدة مع التنميش وبتكبير متدرج.

يبدو الطور η ظاهراً عند التنميش والتكبير ١٠٠٠ مرة بشكل مطابق للصور المرجعية في الصفحة ٦٨ [11].



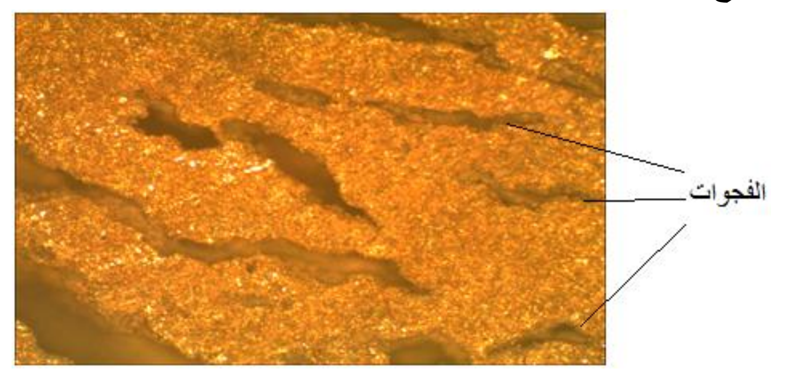
الشكل رقم (١٠١)- بنية عينات الكربيد (WC–CO) الملبدة مع التنميش وبتكبير متدرج.

تم اختيار إحدى العينات (حيث لوحظ وجود تخصر بشكل منتظم في وسط العينة) من اللقم الملبدة في تجربة تلبيد العينات الأولية ضمن الفرن الكتيم بجو غاز الآرغون وقصها على آلة القص بالسلك لإجراء مقطع طولي في منتصفها من أجل فحص البنية من الداخل بشكل مباشر وبدون جلخ أو تنميش كيميائي (منعاً لانغلاق المسامات) وذلك على المجهر الضوئي بتكبير مناسب من أجل الكشف عن تواجد المسامات والفجوات الداخلية. ويتبين ذلك في الشكل (١٠٢):



الشكل (١٠٢)- مقطع طولي في منتصف إحدى العينات الأولية يظهر الفجوات الداخلية المحتجزة.

وتبين الصورة في الشكل (١٠٣) بنية هذه العينة بواسطة المجهر الضوئي بتكبير X 50 وتظهر فيها الفجوات بوضوح.



الشكل (١٠٣)- الفجوات الداخلية المحتجزة لإحدى العينات بتكبير 50X.

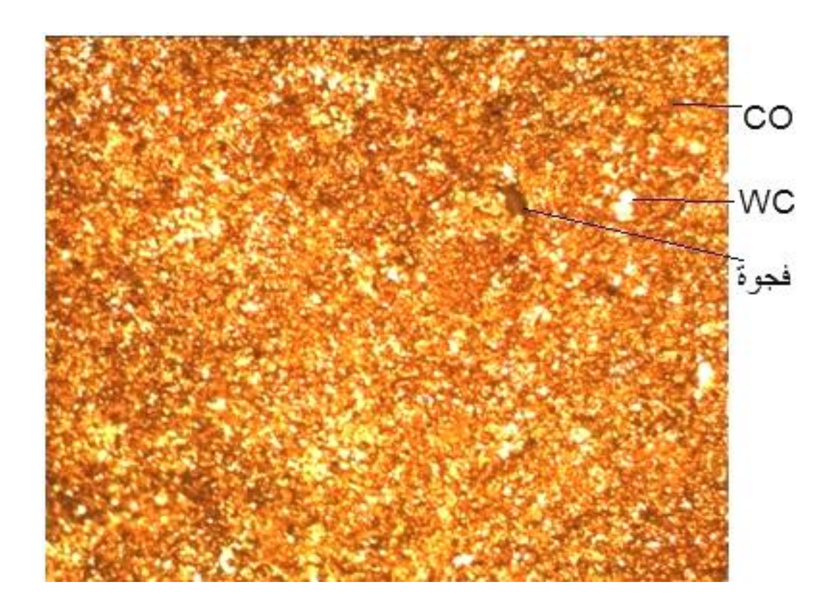
تم اختيار إحدى العينات من اللقم الملبدة في تجربة تلبيد العينات النهائية على مرحلتين (ضمن فرن التخلية 1300 °C – ضغط 0.5Pa ثم عند 1470 °C في مسحوق خامل) التي بلغت قيمة كثافتها النسبية 99% وتم قصها على آلة القص بالسلك لاجراء مقطع طولي فيها من أجل فحص البنية من الداخل بشكل مباشر وبدون جلخ أو تنميش كيميائي على المجهر الضوئي بتكبير مناسب.

توضح الصورة الملتقطة لهذه العينة في الشكل(١٠٤) خلو البنية من الفجوات الظاهرة أو العيوب.



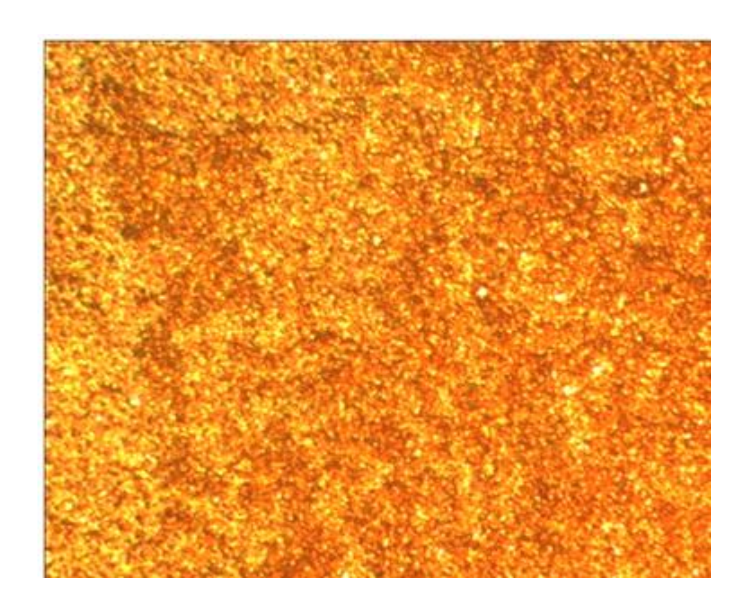
الشكل (١٠٤)- صورة لمقطع طولي في منتصف إحدى عينات اللقم الملبدة على مرحلتين.

وتبين الصورة في الشكل (١٠٥) بنية نفس العينة المقصوصة في المنتصف بآلة القص بالسلك على المجهر الضوئي مكبرة 100X ويبدو خلوها من الفجوات تقريباً في كامل مقطعها.



الشكل (١٠٥)- البنية المجهرية لمقطع طولي في عينة اللقمة الملبدة على مرحلتين X 100.

وللمقارنة، تظهر الصورة في الشكل رقم (١٠٦) البنية المجهرية لعينة من اللقمة المعيارية لشركة Sandvik مكبرة 100X.



الشكل (١٠٦)- البنية المجهرية لعينة من اللقمة المعيارية لشركة Sandvik مكبرة 100X.

الفصل الرابع

الاستنتاجات والتوصيات.

الاستنتاجات.

❖ خواص المسحوق الكربيدي.

- ✓ بينت نتائج قياس التوزع الحجمي للحبيبات أن المسحوق المستخدم هو من النمط الأحادي ويقع حجم حبيباته في المجال الميكرومتري المتوسط (20−45μ).
- ✓ فيما يتعلق بالانسيابية، تبين أنها ضعيفة ويشير هذا إلى خشونة سطح الحبيبات واحتكاكها مع بعضها، الأمر الذي يتطلب المعالجة في حال الإنتاجية الكبيرة.

❖ تحضير العينات.

- ✓ سمحت شروط تحضير العينات من نسب وزنية للمواد المختلفة وخلط وتحبيب وكبس ومعالجة حرارية بالحصول على عينات لقم ملبدة من خليطة مسحوقي كربيد التنغستن والكوبالت حيث تم التركيز على الخليطة (92% WC – 8% Co) نظراً لتوفرها ولأهميتها في معظم تطبيقات أدوات القطع.

- ✓ كانت أفضل شروط التحضير لهذه اللقم هي التالية:
- تطبيق ضغط كبس من الطرفين في المجال (20−15) طن أو ما يعادل (600 MPa)،
- درجة حرارة التلبيد المثلى (1470− 1480 °C)،
- زمن التلبيد (1.5 −1) ساعة،
- أفضل جو للتلبيد هو التلبيد في جو مخلى وعند ضغط تخلخل قدره 0.5 Pa،
- لا يمكن في شروط العمل المتوفرة تلبيد مساحيق الكربيد والكوبالت في الجو العادي أو جو غاز الآزوت أو حتى الآرغون،
- يمكن تلبيد مساحيق الكربيد والكوبالت، بعد التلبيد الأولي ضمن فرن التخلية أو التلبيد في جو من غاز الهيدروجين، بواسطة الغمر في مسحوق خامل كمرحلة لاحقة،

- ✓ سمحت كذلك شروط التحضير بالحصول على البنية والأطوار المطلوبة وهي الطور β ($M_{12}C$) والطور η (Co_3W_3)C الهش تماماً كما هي في مخطط الأطوار.

- ✓ يمكن تحضير العينات بشروط أفضل لو توفر لدينا بعض التجهيزات مثل:

- وجود مطحنة كرات Ball–mill مزودة بأجران خاصة من أجل طحن وتنعيم حجم حبيبات المسحوق الكربيدي وتجانسها وتكتيلها،
- وجود خلاط آلي بدل الخلط اليدوي لضمان التوزع الجيد للمساحيق،
- فرن أولي لحرق وإزالة الرابط العضوي والمواد المزلقة (Debinding)، حيث لا يمكن إجراء التلبيد بكل مراحله ضمن فرن التخلية أو الفرن الكتيم حرصاً على سلامة المسخنات وزيوت مضخات التفريغ،
- فرن تخلية حتى 1600 °C من أجل إجراء التلبيد على مرحلة واحدة وبدون اللجوء الى المرحلة الثانية مع التلبيد في مسحوق خامل.

✓ يمكن تعليل فشل عملية التلبيد الأولى في الفرن الكتيم في جو غاز الآزوت، حيث أن حرارة التلبيد 1475 °C العالية أدت إلى تنشيط غاز الآزوت وتفاعله مع بعض عناصر خليطة الكربيد– كوبالت وتشكل نتريدات صفراء اللون هشة سبّبت تلف العينات.

✓ يمكن تعليل ظهور الانتفاخات في العينات الملبدة في الفرن الكتيم باستخدام غاز الآرغون وفقدان خواصها المغناطيسية بسبب انصهار الكوبالت وفقدانه وتشكيل مسامية مفتوحة ومغلقة بحدود 10–11% مما يؤدي مع احتباس الغازات في المسامات المغلقة واختلافات الكثافة في المضغوطة إلى تشكل إجهادات تسبب تشوه العينات وتخصرها.

✓ يمكن تعليل فقدان الخواص المغناطيسية للعينات الملبدة في التجربتين الأوليتين (الآزوت – الآرغون) وعدم انجذابها نحو المغناطيس بسبب فقد محتوى الكوبالت المغناطيسي في العينات نتيجة حصول النتردة في تجربة غاز الآزوت وكذلك نتيجة الأكسدة الشديدة الحاصلة في تجربة غاز الآرغون ويعود ذلك لعدم كفاية نقاوة الغاز المستخدم (يجب استخدام غاز آرغون مخبري).

❖ الانكماشات والتقلصات.

الفقد في الوزن.

تراوحت نسبة الفقد في الوزن بعد التلبيد خلال كافة التجارب ما بين (3–7%)، وهي تعبر تماماً عن النسبة الوزنية للمواد الرابطة والمواد المزلقة المستخدمة أثناء تحضير الخليط المعد للكبس.

التقلصات في الأبعاد.

- ✓ **الانكماشات الخطية.**

بعد التلبيد، تراوحت نسبة الانكماشات الخطية للأبعاد في المجال (15–17%) وقد تم إدخال هذا المعامل الهام لدى تصميم قالب اللقمة النهائية وتعتبر هذه القيمة ثابتة من أجل خليطة المسحوق المدروسة (WC92% – Co8%) مع نسبة وزنية قدرها 7% من الرابط العضوي والمادة المزلقة. ويحدث التقلص في الأبعاد أيضاً نتيجة ارتفاع الكثافة وتناقص حجم المسامات المتواجدة قبل التلبيد.

- ✓ **الانكماشات الحجمية.**

بعد التلبيد، تراوحت نسبة الانكماش في الحجم في المجال (33–40%)، وتعد هذه القيمة كبيرة ومنطقية جداً بالنسبة للكربيدات القصفة عديمة اللدونة. و يعبر هذا الانكماش في الحجم عن إزالة المادة الرابطة العضوية في خليطة الكربيد وعن تناقص حجم المسامات التي تم إغلاقها بعد ملئها بالكوبالت المنصهر خلال التلبيد إضافة الى التغيرات في البنية.

❖ قياس الكثافة والمسامية.

تم التوصل من خلال شروط عملية التلبيد المثالية الى قيمة مقاربة جداً من قيم الكثافة النظرية للكربيد الملبد فيما يخص الخليطة المدروسة وهي $14.7\ gcm^{-3}$ وبلغت نسبة المسامية أقل من 1%.

- ✓ تزداد الكثافة الرطبة (الخضراء) وتتناقص المسامية المرافقة مع ازدياد ضغط الكبس المطبق،
- ✓ عموماً، تزداد الكثافة وتتناقص المسامية مع ازدياد درجة حرارة وزمن التلبيد،
- ✓ تتحسن الكثافة النهائية بعد التلبيد مع زيادة ضغط الكبس المطبق حتى عتبة محددة.

❖ الخواص الميكانيكية.

مقاومة الانعطاف.

- ✓ تزداد مقاومة الانعطاف بشكل كبير بعد التلبيد وتصل الى قيمها المعروفة لخلائط الكربيد الملبد، أي 1379 MPa بعد أن كانت بحدود 8 MPa للمضغوطات الرطبة (الخضراء).

وتعدُّ قيم معامل يونغ، بحدود 200 GPa، قريبة من القيم التجريبية للكربيد الملبد، أي 400− 600 GPa. ويعزى انخفاض قيم معامل يونغ لعينات البحث إلى كبر حجم حبيباتها وإلى المسامية وعيوب التصنيع الدقيقة المتبقية وإلى فترة تخزينها الطويلة قبل استعمالها، اضافة الى تشكل كمية من الطور الهش η.

❖ اختبارات القساوة.

- ✓ سمحت شروط التلبيد على مرحلتين بالوصول الى قيم القساوة المعروفة للكربيد الملبد فيما يخص الخليطة المدروسة أي 70 HRC ويعتبر هذا المعامل من أهم ما يميز أدوات القطع الكربيدية،
- ✓ تزداد القساوة بعد التلبيد مع زيادة ضغط الكبس المطبق حتى عتبة محددة،
- ✓ عموماً، تزداد القساوة مع زيادة حرارة التلبيد،
- ✓ يجب مراعاة قياس القساوة على مقياس روكويل A أو سلم فيكرز (أحمال غير عالية) تجنباً لتكسير العينة.

❖ الفحص المجهري.

- ✓ يبدو شكل حبيبات المسحوق الكربيدي أقرب إلى الشكل شبه الكروي،
- ✓ بعد الكبس، تبدو البنية عبارة عن تشابك قوي لحبيبات مسحوق خليطة الكربيد مع إمكانية التمييز بين حبيبات الكوبالت والكربيد العاكسة للضوء،
- ✓ تظهر بنية العينات الملبدة توزع الكوبالت وتشكيل أساس رابط يحيط بحبيبات الكربيد،
- ✓ تشير الصور المجهرية للعينات الملبدة إلى تشكل طور جديد لمحلول صلب هو محلول كربيد التنغستن في الكوبالت (الطور β المقوي) على هيئة حبيبات صغيرة موزعة في معدن Matrix وتتوقف كميته على محتوى الكربون والكوبالت، كما يبدو تشكل كمية من الطور الهش η أو $(Co_3W_3)C$ عند حدود حبيبات WC وذلك على حساب خسارة كمية من الرابط المعدني المتبقي (الكوبالت)، الأمر الذي سبب بعض الهشاشة في البنية وساهم في اضعاف متانة الكربيد الملبد، نجم عنه انخفاضاً ملحوظاً في قيمة معامل يونغ لكربيد التنغستن الملبد (200Gpa) التي تم قياسها ضمن اختبار الانعطاف [9، 15].

التوصيات.

يعدُّ هذا العمل خطوة أولى متقدمة نحو توطين تقانة تعدين المساحيق الكربيدية التي تعتبر السبيل الوحيد لتصنيع أدوات القطع واللقم الكربيدية. وكما هو معروف، تقترن الأعمال الأولى بمصاعب جمة ترتبط بالامكانات المحدودة المتوفرة. ومع كل هذه الصعوبات، أمكن إقامة الدليل على إمكانية تحضير وتوصيف لقم كربيدية مماثلة في عدد من خواصها البنيوية والميكانيكية للقم المنتجة لدى الشركات العريقة في هذا المضمار.

وعلى ضوء النتائج المنجزة، نوصي بما يلي:

- الاهتمام والعمل الحثيث لتوطين تقانة تعدين المساحيق الكربيدية والسيراميكية في القطر،
- توفير التجهيزات اللازمة للقيام بمزيد من أعمال البحوث والتطوير والمتابعة في هذا المجال لاستكمال دراسة وتصنيع اللقمة الكربيدية حتى مراحلها النهائية،
- الاهتمام بموضوع طلاء اللقمة الكربيدية بمادة نتريد التيتانيوم وفق الأسلوب المعتمد بواسطة تقانة PVD أو CVD، وذلك لتكامل عملية التصنيع التي تحتاجها هذه اللقم من أجل تحسين مواصفاتها ورفع أدائها وإطالة عمرها وتمكينها من تشغيل معظم الخلائط الفولاذية وحتى الخلائط الفولاذية مسبقة التقسية،
- يمكن أن يشكل موضوع طلاء اللقمة الكربيدية محور بحث مستقبلي،
- توفير بدائل لفرن التلبيد للتمكّن من إجراء عمليات التلبيد تحت الخلاء في مرحلة واحدة حتى درجات الحرارة العالية (1475 °C)،
- إقامة خط إنتاج إرشادي لتصنيع أدوات القطع واللقم الكربيدية في القطر على ضوء النتائج المشجعة نظراً للكم الهائل الذي يستهلكه القطاع العام والخاص من هذه اللقم،
- الاهتمام بالمساحيق المعدنية النانومترية فيما يخص تعدين المواد المركبة النانومترية ذات الرابط المعدني والسعي لإدراجها ضمن محور بحث مستقبلي.
- ادخال تعدين المساحيق المعدنية كمادة تدريسية في مناهج كليات الهندسة الميكانيكية– قسم التصميم والانتاج في سوريا.

المراجع

1- Gopal Shankar UPADHAYA "Powder metallurgy Technologies" , Cambridge Int Science 1997, chapter 3-4-5-6 PP 22.

2- Randall M. German "Powder Metallurgy Science" , Second Edition , MPIF ,1994.

3- Mikel.P.Groover, "Fundamentals of Modern Manufacturing",4th/edition,2010 Section16.1 ,Characterization of Engineering Powders pp347,380, [section 17.1].

4- P.C.Angelo ،R. Subramanian ,"Powder Metallurgy Science,Technology & Application", first edition ,2008, pp 44-64 , 281-288, 77-81,128, chapter5.

5- "Powder metallurgy Technologies & Application" ASM Metals Handbook , Vol7 ,1998.

6- http://www.Cjtech.co.kr/Process Principles Wet Granulation.htm.

7- "Powder Metallurgy EIN 3390 Manufacturing Processes" Spring, 2012-Chapter18.

8- Fritz Thümmler & R.Oberacker, "An Introduction to Powder Metallurgy" , Institute of Materials LONDON, 1993, pp 121,133 ~ 284.

9- Gopal S. Upadhyaya ,"Cemented Tungsten Carbide", India ,1998, pp13 - 35 ,110-170

10- http://www.custompartnet.com/wu/images/metal-injection-molding/mim.png
http://www.ctemag.com/aa_pages/2014/140316-Moldmaking.html

11- "Metallography and microstructures" ASM Metals Handbook, VOL9 , 1992, PP513-527.

12 - Hugh 0. Pierson, "Handbook of Refractory CARBIDES AND NITRIDES Properties, Characteristics, Processing and Applications", Published in USA, 1996.pp113-116.

13- Michael Ashby, "Materials: Engineering, Science,Processing and Design", 1st/edition Elsevier Ltd, 2007 , Chapter 4, pp62 .

14- Alexey S. Kurlov , Aleksandr I. Gusev,"Tungsten Carbides, Structure, Properties and Application in Hardmetals" , Springer Series in Materials Science V184, 2013, pp 6,25,27,39.

15- "Calculation of Phase Diagrams using the CALPHAD Method", 2011.
http://www.calphad.com/tungsten-cobalt-carbon.html.

16- Sandvik Coromant ,"Modern Metal Cutting", First edition,1996 ,Practical Handbook.

17- Sandvik ,"Cemented Carbide", new developments and applications, 2005.

18- A.S.Kurlov, A.A.Rempel "Effect of sintering temperature on the phase composition and microhardness of WC-8wt%Co cemented carbide", Volume43, Issue 6,2007, pp 602-607.

19- Z.Z. Fang, O.O. Eso,"Liquid phase sintering of functionally graded WC–Co composites", International Journal of Refractory Metals & Hard Materials,2005,pp787-786.

20- Mehmet Erkin Cura, Juha Lagerbom, Riina Ritasalo ,"Process parameter optimization of pulsed electric current sintering of WC-8Co powder",Estonian Journal of Engineering, Department of Materials Science, Helsinki University of Technology, 2009, pp 255–265.

21- Anders Petersson, "Cemented Carbide Sintering:Constitutive Relations and Microstructural Evolution" , Royal Institute of Technology,Department of Materials Science and Engineering ,2004 ,(Academy article).

الملحق رقم (١)

فولاذ العدة D_6 :

المواصفات الفنية والتركيب الكيميائي والتطبيقات حسب دليل الفولاذ KEY TO STEEL.

1.2436

DIN : X 210CrW12

AISI : D6

CHEMICAL COMPOSITION %				
C	Si	Mn	Cr	W
2.10	0.35	0.35	12.0	0.70

جدول رقم (١١)- المواصفات الفنية والتركيب الكيميائي لمعدن القالب D_6.

STEEL PROPERTIES:

Ledeburitic high-carbon high-chromium tool steel, very high wear-resistance and cutting-edge endurance quality

APPLICATIONS:

cold work tool steel.

Very high wear resistance. Better hardenability.

Blanking dies for cutting transformers sheets up to 2 mm, deep drawing tools, stamps, moulds for pressing abrasive powders.

Heat Treatment	Temperature	Time	Cooling
Soft Annealing	800 – 840 °C	2 – 5 hours	Furnace
Stress Relieving	600 – 650 °C	2 hours	Furnace
Hardening	960 – 980 °C	20- 30 min	Oil , Air
Tempering	160 – 300 °C	2 hours at least	Air

Tempering Temperature °C	100	200	300	400	500	600
HRC	63	62	60	58	56	48

معاملات المعالجة الحرارية لمعدن القالب (فولاذ D_6).

الملحق رقم (2)

الجمهورية العربية السورية
مركز الدراسات و البحوث العلمية
معهد بحوث ٠٠٠

تقرير التحليل

(صفحة ١ من١)

رقم التقرير: ٢٠١٢/١١٠	تاريخ إصدار التقرير: ٢٠١٢/٦/١٠
رقم طلب التحليل: ٢٠١٢/٠٨٣	تاريخ طلب التحليل: ٢٠١٢/٥/٢٠

معلومات الزبون	
اسم الزبون	معاون المدير العام / ش ص ج
الهاتف:	
رقم كتاب الطرح: بلا	تاريخ كتاب الطرح: ٢٠١٢/٥/١٧
نوع العينات: معدنية (لصالح مشروع نقانة الـ P.M)	عدد العينات: ١

نتائج التحليل

رقم/رمز العينة	التحليل المطلوب	النتيجة	طريقة التحليل	ملاحظات
عينة معدنية	تحديد التركيب	تبين نتيجة تحليل العينة أنها مكونة من WC % = 92.0 Co %= 7.50 Ti % =max 1.0 Fe% =max 0.2 Si % =max 0.3	EDX,AAS CS analyser Colorimetry Gravimetry	

مرفقات	
آراء وتفسيرات	ـ يعتقد أن التيتانيوم من طبقة الطلاء الخارجية (إذا لم يتم فصلها بالاعتبار بشكل كامل) ـ طبقة الطلاء تحتوي عنصر التيتانيوم بشكل رئيسي

المحلل المسؤول	التوقيع:	التاريخ: ٢٠١٢/٦/١٠
رئيس المخبر	التوقيع:	التاريخ: ٢٠١٢/٦/١٠

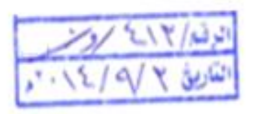
يتوهد

مدير معهد بحوث ٠٠٠
د.

ملاحظات: - نتائج التحليل تخص فقط العينات المحللة.
- كل تقرير غير موقع ومختوم يعتبر غير صالح.
- لا يسمح باستخدام أو تصوير هذا التقرير إلا كاملاً.

التحليل الكيميائي للقمة الكربيدية المرجعية.

الجمهورية العربية السورية
مركز الدراسات والبحوث العلمية
المعهد ...



تقرير التحليل

رقم التقرير : ٢٥٨ / ٢٠١٤	تاريخ إصدار التقرير : ٢٠١٤/٠٩/٠٢
رقم طلب التحليل : ٢٤٣ / ٢٠١٤	تاريخ طلب التحليل : ٢٠١٤/٠٨/١٦

معلومات الزبون

اسم الزبون : المعهد ٢٠٠٠	
الهاتف :	
رقم كتاب الطرح : ٨٦٤ /٢٠٠٠	تاريخ كتاب الطرح : ٢٠١٤/٠٨/١٦
نوع العينات : مسحوق	عدد العينات : ٢

نتائج التحليل

التحليل المطلوب	نتيجة التحليل ،%		طريقة التحليل	ملاحظات
	مسحوق /1 قبل التلبيد	مسحوق /2 بعد التلبيد		
كربيد التنغستين WC	89.93±0.50	89.0±1.0	gravimetry	
Si	max 0.30	max 0.20	CS analyser,	
Co	8.0±0.3	7.3±0.50	gravimetry	
Free C	max 0.3	max 0.2	AAS	
Fe	0.24±0.02	0.95±0.10		

المرفقات	
آراء وتفسيرات	ـ العينة رقم 2 غير متجانسة

المحلل المسؤول	التوقيع:	التاريخ:٢٠١٤/٩/٢
رئيس المخبر	التوقيع:	التاريخ:٢٠١٤/٩/٢

شوهد

مدير المعهد

التحليل الكيميائي للمسحوق المستخدم في تصنيع اللقمة الكربيدية قبل وبعد التلبيد.